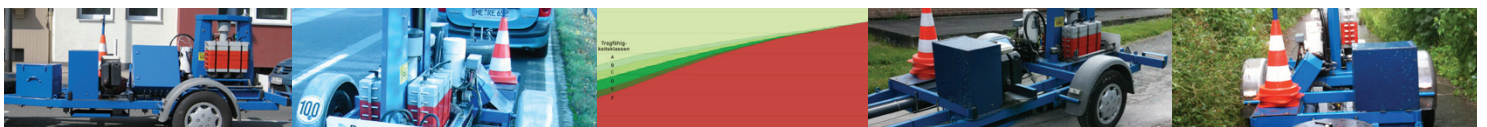


Quantitative Bewertung der Tragfähigkeit von Asphaltbefestigungen durch Falling-Weight-Deflectometer Messungen

Marcel Knauff

**Heft 4
Essen 2015**



Schriftenreihe

Marcel Knauff

**Quantitative Bewertung der Tragfähigkeit
von Asphaltbefestigungen
durch Falling-Weight-Deflectometer Messungen**

2015

Quantitative Bewertung der Tragfähigkeit von Asphaltbefestigungen durch Falling-Weight-Deflectometer Messungen

Vom Fachbereich Ingenieurwissenschaften, Abteilung Bauwissenschaften,
der Universität Duisburg-Essen zur Erlangung des akademischen
Grades eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.) genehmigte Dissertation

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Marcel Knauff

aus Rheinberg

Referent:	Prof. Dr.-Ing. Edeltraud Straube Prof. Dr. rer. nat. habil. Doru C. Lupascu
Korreferent:	Dr.-Ing. habil. Jürgen Hothan

Tag der Einreichung: 02. Februar 2015

Tag der mündlichen Prüfung: 20. Mai 2015

Essen 2015

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	I
Tabellenverzeichnis.....	II
Diagrammverzeichnis.....	III
Abkürzungen und Formelzeichen	IV
Formelverzeichnis	V
1 Einleitung	1
1.1 Problemstellung	1
1.2 Zielsetzung	2
1.3 Arbeitsschritte	2
2 Beanspruchung durch den Verkehr	4
2.1 Dynamische Beanspruchung	10
2.2 Statische Beanspruchung	16
2.3 Tragfähigkeit	16
3 Falling-Weight-Deflectometer (FWD)	19
4 Mehrschichtentheorie	25
5 Ansätze zur Bewertung der Tragfähigkeit einer Asphaltstraßenbefestigung	29
5.1 Jendia	29
5.2 Bewertungshintergrund Universität Karlsruhe.....	32
6 Erstellung Referenzsystem	34
6.1 Randbedingungen	34
6.1.1 Schichtenaufbau (Belastungsklassen)	34
6.1.2 E-Modul der Schichten	38
6.1.3 Temperatureinfluss	42
6.1.4 Belastung und Belastungsfrequenzen.....	43
6.2 Erstellung des Referenzsystems	44
6.2.1 Tragfähigkeitsklassen.....	44
6.2.2 Aufbau des Referenzsystems	45
7 Lösungsansatz zur Untergrundkorrektur.....	48
7.1 Standard Bettungsmodul	48
7.2 Bestimmung des Untergrund-E-Modul.....	48
7.3 Einfluss des Bettungsmoduls.....	51

7.4 Virtuelle Verschiebung der Deflexionsmulde auf den Standard Bettungsmodul	51
7.5 Definition der Oberbaubereiche	61
7.5.1 Berücksichtigung des Bettungsmoduls	61
7.5.2 Berücksichtigung der Oberbaudicke	62
7.5.3 Aufstellung der Oberbaubereiche	64
7.5.3.1 Ansatz mit zeichnerischer Oberbaubereichseinteilung (Zeichnerischer Ansatz)	64
7.5.3.1.1 Vergrößerung der Oberbaubereiche	65
7.5.3.1.2 Oberbaubereiche für unterschiedliche Bettungsmoduln	66
7.5.3.1.3 Oberbaubereiche für den zeichnerischen Ansatz	67
7.5.3.2 Ansatz mit der rechnerischen Oberbaubereichseinteilung (Rechnerischer Ansatz)	70
7.6 Verschiebungsfaktoren	71
7.6.1 Tafeln mit Verschiebungsfaktoren	72
7.6.2 Berechnung der Verschiebungsfaktoren	75
7.7 Ablauf der Untergrundkorrektur	80
7.8 Exemplarische Untergrundkorrektur	81
8 Quantitative Bewertung der Tragfähigkeit von Asphaltstraßenbefestigung..	88
8.1 Bestimmung der Tragfähigkeitsklassen	88
8.1.1 Ansatz mit zeichnerischer Tragfähigkeitseinteilung (Zeichnerischer Ansatz)	88
8.1.2 Ansatz mit rechnerischer Tragfähigkeitsklasseneinteilung (Rechnerischer Ansatz)	91
8.2 Ablauf der quantitativen Bewertung von Asphaltbefestigungen	92
8.3 Exemplarische quantitative Bewertung von Asphaltbefestigungen	94
8.4 Vergleich mit qualitativen Bewertung nach JENDIA	98
9 Zusammenfassung und Ausblick	99
9.1 Zusammenfassung	99
9.2 Ausblick	101
Quellenverzeichnis	102
Literaturverzeichnis	102
Verzeichnis der Internetquellen	105
Software	105
Anlage 1 Oberbaubereiche: Abweichung der Verschiebungsfaktoren	106
Anlage 2 Oberbaubereichstafeln	107

Anlage 3	Verschiebungsfaktoren Tafeln.....	108
Anlage 4	Tabellarische Darstellung der Tragfähigkeitsklassen A – E.....	113
Anlage 5	Verschiebungsfaktoren 3D Diagramme	114
Anlage 6	Theorie des FWD-Verfahrens	123
Anlage 7	Algorithmus zur quantitativen Bewertung der Tragfähigkeit von Asphaltstraßenbefestigungen	133

Abbildungsverzeichnis

ABBILDUNG 2.1: DYNAMISCHE DURCHBIEGUNG EINER STRAßENBEFESTIGUNG [2.8].....	4
ABBILDUNG 2.2: SPANNUNGEN UND VERFORMUNGEN INFOLGE DER VERKEHRSBELASTUNG [19].....	6
ABBILDUNG 2.3: STOFFGESETZE ALS RHEOLOGISCHE MODELLE [38]	8
ABBILDUNG 2.4: VERSCHIEBUNGEN EINES INFINITESIMAL KLEINEN VOLUMENELEMENTS UND DIE VERSCHIEBUNGEN IM RAUM BEIM DURCHGANG EINER SCHERWELLE UND EINER KOMPRESSIONSWELLE [28]	12
ABBILDUNG 2.5: VERLAUF DER BESSEL-FUNKTIONEN $J_0(x)$ UND $J_1(x)$ [51].....	14
ABBILDUNG 2.6: VERLAUF DER VERFORMUNG u UND w ÜBER DIE TIEFE z [28]	15
ABBILDUNG 2.7: REAKTION EINER STRAßENBEFESTIGUNG INFOLGE EINER AUFGEBRACHTEN BELASTUNG [45].....	17
ABBILDUNG 3.1: FWD DER UNIVERSITÄT DUISBURG-ESSEN (FIRMA DYNATEST, TYP 8000).....	19
ABBILDUNG 3.2: MESSPRINZIP DES FALLING-WEIGHT-DEFLECTOMETER (FWD)[3]	20
ABBILDUNG 3.3: KRAFTIMPULS BEIM FALLING-WEIGHT-DEFLECTOMETER (FWD), PRINZIPISSKIZZE[45].....	21
ABBILDUNG 3.4: KRAFT-ZEIT- UND VERFORMUNGS-ZEIT-VERLAUF BEIM FWD [5][21][22].....	22
ABBILDUNG 4.1: BEANSPRUCHUNGEN IM MEHRSCICHTENMODELL, PRINZIP [45]	26
ABBILDUNG 4.2: SPANNUNGSKOMPONENTEN AN EINEM RAUMELEMENT IN ZYLINDER-KOORDINATEN [12]	27
ABBILDUNG 5.1: U - T_z -DIAGRAMM ZUR BEURTEILUNG DER TRAGFÄHIGKEIT [32]	31
ABBILDUNG 6.1: REFERENZSYSTEM (SCHICHTDICKEN DES ZWEISCHICHTSYSTEMS)	47
ABBILDUNG 7.1: ABLAUF DER UNTERGRUNDKORREKTUR	80
ABBILDUNG 8.1: ABLAUF DER QUANTITATIVEN BEWERTUNG DER TRAGFÄHIGKEIT VON ASPHALTBEFESTIGUNGEN.....	93
ABBILDUNG 9.1: MODELLDARSTELLUNG DES FWD-VERSUCHES [8].....	123
ABBILDUNG 9.2: KRAFT $P(t)$ UND DEFLEXION $w(t)$ AUS DEM MODELL DES FWD [8]	124
ABBILDUNG 9.3: KRAFT $P(t)$ AUS EINEM FWD-VERSUCH (GEPUNKTET), ANGLEICHUNG DURCH KRAFTVERLAUF AUS DER MODELLRECHNUNG (DURCHGEZOGENE LINE) [8].....	125
ABBILDUNG 9.4: REAKTION DES MODELLS A, B, C DER STRAßENBEFESTIGUNG AUF EINE BELIEBIGE KRAFT $P(t)$ [8]	126
ABBILDUNG 9.5: REAKTION $w(t)$ DES STRAßENMODELLS A, B, C AUF DEN FWD-IMPULS, $A=1.000\text{KG}$, $C=150\text{MN/M}$, LINKS: $B = 500\text{ KN}\cdot\text{s/M}$; RECHTS: $B = 200\text{ KN}\cdot\text{s/M}$ [8]	127
ABBILDUNG 9.6: EINFLUSS VON MASSE A UND DÄMPFUNG B AUF DIE TRAGFÄHIGKEIT S [8]	129
ABBILDUNG 9.7: ZUR FOURIER-ANALYSE UND SYNTHESE [18]	130
ABBILDUNG 9.8: DISPERSIONSMESSUNG AUF DER AUTOBAHN HAMBURG-HANNOVER (BETON) [7]	131
ABBILDUNG 9.9: DEFLEXIONSIMPULS $w(t)$ MIT DISPERSION BEI VERSCHIEDENEN ENTFERNUNGEN R VOM LASTZENTRUM [8].....	132

Tabellenverzeichnis

TABELLE 5.1: BEURTEILUNG DER TRAGFÄHIGKEIT EINER STRAßENBEFESTIGUNG AUFGRUND DES UI-Tz-DIAGRAMMES NACH JENDIA.....	32
TABELLE 6.1: TRAGFÄHIGKEITSKLASSEN.....	44
TABELLE 6.2: BERECHNUNG DER OBERBAUSCHICHTDICKE FÜR DAS 2-SCHICHTSYSTEM.....	47
TABELLE 7.1: ZUSAMMENFASSUNG DER VERSCHIEBUNGSFAKTORENBEREICHE	59
TABELLE 7.2: SCHEMA EINER TAFEL MIT VERSCHIEBUNGSFAKTOREN	60
TABELLE 7.3: AUSWAHL DER VERSCHIEBUNGSFAKTOREN ANHAND DES BETTUNGSMODULS.....	60
TABELLE 7.4: BETTUNGSBEREICHE	67
TABELLE 7.5: EINTEILUNG DER OBERBAUBEREICHSTAFELN.....	70
TABELLE 7.6: OBERBAUBEREICHSTABELLEN.....	71
TABELLE 7.7: ABWEICHUNG DER VERSCHIEBUNGSFAKTOREN - OBERBAUBEREICHE	74
TABELLE 7.8: BERECHNUNG DER VERSCHIEBUNGSFAKTOREN, FORMEL	78
TABELLE 7.9: BERECHNUNG DES OBERBAUMODULS, FORMELN.....	79
TABELLE 7.10: GEMESSENE DEFLEXIONSMULDEN	82
TABELLE 7.11: ERGEBNIS DER UNTERGRUNDKORREKTUR.....	87
TABELLE 8.1: BERECHNETE DEFLEXIONSMULDEN FÜR DIE TRAGFÄHIGKEITSKLASSEN A - E	92
TABELLE 8.2: BESTIMMUNG DER TRAGFÄHIGKEITSKLASSEN MIT DER DEFLEXIONSDIFFERENZ	92
TABELLE 8.3: GEMESSENE DEFLEXIONSMULDEN	94
TABELLE 8.4: QUALITATIVE BEWERTUNG DER GEMESSENEN DEFLEXIONSMULDEN NACH JENDIA.....	98

Diagrammverzeichnis

DIAGRAMM 3.1: DARSTELLUNG DER FWD MESSWERTE ALS DEFLEXIONSMULDE.....	24
DIAGRAMM 3.2: DEFLEXIONSPROFIL DER DEFLEXION IM LASTZENTRUM (D_0) UND DEFLEXION 1.800 MM VOM LASTZENTRUM (D_{1800}) ENTFERNT	24
DIAGRAMM 6.1: EINFLUSS DER ASPHALTSCHICHTDICKEN.....	35
DIAGRAMM 6.2: EINFLUSS DER TOB-SCHICHTDICKE (BELASTUNGSKLASSE Bk100)	36
DIAGRAMM 6.3: EINFLUSS DER TOB-SCHICHTDICKE (BELASTUNGSKLASSE Bk1,8)	37
DIAGRAMM 6.4: EINFLUSS DER ASPHALT- UND TOB-SCHICHTDICKE (BELASTUNGSKLASSE Bk100 – Bk1,8)	37
DIAGRAMM 6.5: EINFLUSS DES ASPHALTSCHICHTEN E-MODULS AUF DIE DEFLEXIONSMULDE	39
DIAGRAMM 6.6: EINFLUSS DER SCHICHTDICKEN UND DES ASPHALTSCHICHT E-MODULS AUF DIE DEFLEXIONSMULDE	40
DIAGRAMM 6.7: EINFLUSS DES TOB-E-MODULS AUF DIE DEFLEXIONSMULDE.....	41
DIAGRAMM 6.8: EINFLUSS DES UNTERGRUND E-MODULS AUF DIE DEFLEXIONSMULDE	42
DIAGRAMM 6.9: ABSOLUTER MODUL IEI VON ASPHALT IN ABHÄNGIGKEIT VON DER TEMPERATUR BEI VERSCHIEDENEN FREQUENZEN [8]	43
DIAGRAMM 7.1: EINFLUSS DES OBERBAUMODULS E_A AUF DIE DEFLEXIONSMULDE.....	49
DIAGRAMM 7.2: EINFLUSS DES UNTERGRUND-E-MODUL (BETTUNGSMODUL E_0) AUF DIE DEFLEXIONSMULDE	49
DIAGRAMM 7.3: HÄUFIGKEITSVERTEILUNG GEMESSENER UNTERGRUND-E-MODULN (BETTUNGSMODULN E_0) MIT DEM FWD	50
DIAGRAMM 7.4: DEFLEXIONSVERLAUF AUFGRUND UNTERSCHIEDLICHER BETTUNGSMODULN	52
DIAGRAMM 7.5: EINFACHE VERSCHIEBUNG DER DEFLEXIONEN	53
DIAGRAMM 7.6: UNTERSCHIEDLICHE ABSTÄNDE ZWISCHEN DEN DEFLEXIONEN	54
DIAGRAMM 7.7: VERSCHIEBUNG MIT VERSCHIEBUNGSFAKTOREN	55
DIAGRAMM 7.8: ANSATZ DER UNTERGRUNDKORREKTUR - UNGLEICHMÄßIGEN VERSCHIEBUNG.....	55
DIAGRAMM 7.9: DEFLEXIONSMULDEN MIT EINEM BETTUNGSMODUL BEREICH $E_0 = 115 - 500 \text{ MN/m}^2$ (SCHRITTWEITE VON 5 MN/m^2) UND OBERBAUMODUL $E_A = 5.000 \text{ MN/m}^2$	57
DIAGRAMM 7.10: DEFLEXIONSMULDEN MIT EINEM BETTUNGSMODUL $E_0 = 115 \text{ MN/m}^2$ UND OBERBAUMODUL BEREICH $E_A = 1.000 - 25.000 \text{ MN/m}^2$ (SCHRITTWEITE VON 1.000 MN/m^2)	58
DIAGRAMM 7.11: OBERBAUBEREICHE MIT EINEM BETTUNGSMODUL $E_0 = 115 \text{ MN/m}^2$ UND OBERBAUMODUL BEREICH $E_A = 1.000 - 25.000 \text{ MN/m}^2$ (SCHRITTWEITE VON 1.000 MN/m^2)	61
DIAGRAMM 7.12: OBERBAUBEREICHE FÜR ZWEI BETTUNGSMODULN ($115 / 500 \text{ MN/m}^2$)	62
DIAGRAMM 7.13: DEFLEXIONEN BEI SCHICHTDICKEN DER TRAGFÄHIGKEITSKLASSE A	63
DIAGRAMM 7.14: DEFLEXIONEN BEI SCHICHTDICKEN DER TRAGFÄHIGKEITSKLASSE E	63
DIAGRAMM 7.15: BESTIMMUNG DES OBERBAUBEREICHS (UNGLEICHMÄßIGER VERLAUF)	64
DIAGRAMM 7.16: ZUORDNUNG DER GEMESSENEN DEFLEXIONSMULDE ZU DEN VERGRÖßERTEN OBERBAUBEREICHEN.....	66
DIAGRAMM 7.17: OBERBAUBEREICHE FÜR DIE VIER BETTUNGSBEREICHE	67
DIAGRAMM 7.18: OBERBAUBEREICHSTAFEL 1	68
DIAGRAMM 7.19: OBERBAUBEREICHSTAFEL 2	68
DIAGRAMM 7.20: OBERBAUBEREICHSTAFEL 3	69
DIAGRAMM 7.21: OBERBAUBEREICHSTAFEL 4	69
DIAGRAMM 7.22: MITTELWERTBILDUNG DER VERSCHIEBUNGSFAKTOREN	72
DIAGRAMM 7.23: ENTWICKLUNG DER VERSCHIEBUNGSFAKTOREN (ABSTAND: 1800 MM)	73
DIAGRAMM 7.24: ENTWICKLUNG DER VERSCHIEBUNGSFAKTOREN (ABSTAND: 0 MM)	73
DIAGRAMM 7.25: VERSCHIEBUNGSFAKTOREN DER OBERBAUBEREICHE FÜR UNTERSCHIEDLICHE BETTUNGSMODULN IM LASTZENTRUM.....	75
DIAGRAMM 7.26: VERSCHIEBUNGSFAKTOREN IN ABHÄNGIGKEIT VOM OBERBAUMODUL FÜR FÜNF BETTUNGSMODULN IM LASTZENTRUM.....	76
DIAGRAMM 7.27: VERSCHIEBUNGSFAKTOREN FÜR UNTERSCHIEDLICHE OBERBAU- UND BETTUNGSMODULN IM LASTZENTRUM, 3D-DIAGRAMM	77
DIAGRAMM 7.28: BESTIMMUNG DES OBERBAUMODULS, REGRESSION	79
DIAGRAMM 7.29: GEMESSENE DEFLEXIONSMULDEN.....	82
DIAGRAMM 7.30: BESTIMMUNG DES OBERBAUBEREICHS, OBERBAUBEREICHSTAFEL 4	83
DIAGRAMM 7.31: BESTIMMUNG DES OBERBAUBEREICHS, OBERBAUBEREICHSTAFEL 3	84
DIAGRAMM 7.32: EXEMPLARISCHE UNTERGRUNDKORREKTUR	87
DIAGRAMM 8.1: BERECHNETE DEFLEXIONSMULDEN FÜR DIE TRAGFÄHIGKEITSKLASSEN A - E.....	89
DIAGRAMM 8.2: BEREICHE DER TRAGFÄHIGKEITSKLASSEN A - E	90
DIAGRAMM 8.3: BESTIMMUNG DER TRAGFÄHIGKEITSKLASSEN A – E	91
DIAGRAMM 8.4: GEMESSENE DEFLEXIONSMULDEN	95
DIAGRAMM 8.5: EXEMPLARISCHE ZEICHNERISCHE BESTIMMUNG DER TRAGFÄHIGKEITSKLASSE	96

Abkürzungen und Formelzeichen

Formelzeichen

A	Variable in der Querdehnzahl-Funktion des Dresdner Modells
a	Radius der Reifenaufstandsfläche
d_1	Deflexion im Lastzentrum der Deflexionsmulde
d_{12}	Deflexionsdifferenz: $D_0 - D_{300}$
D_i	Deflexion am Geofon i
$D(\alpha)_i$	Mit Verschiebungsfaktor α verschobene Deflexion am Geofon i
D_{Diff}	Deflexionsdifferenz: $D_0 - D_{1500}$
E	E-Modul
E_0	Bettungsmodul
E_3	E-Modul des Untergrundes bzw. Unterbaues
E_A	Oberbaumodul
E_n	E-Modul der Schicht n
i	Abstand zum Lastzentrum (Geofon) [mm]
n	Anzahl der Schichten
p	Reifenkontaktdruck
$p_{00} \dots p_{05}$	Koeffizienten für Berechnung der Verschiebungsfaktoren
R_0	Krümmungsradius in der Lastachse der Deflexionsmulde
T_z	Tragfähigkeitszahl
h_n	Dicke der Schicht n
U_E	Deflexion am Abstand zum Lastzentrum 1800mm
UI	Untergrund/Unterbau-Indikator
X_i	Differenz der Deflexion am Geofon i zwischen zwei Deflexionsmulden ($x_0 = D_{1800, M2} - D_{1800, M1}$)
α_i	Verschiebungsfaktor für Geofon i

ν_n	Querkontraktionszahl der Schicht n
μ	Querdehnzahl

Abkürzungen

FWD	Falling-Weight-Deflectometer
Kfz	Kraftfahrzeug
ToB	Tragschichten ohne Bindemittel
UI	Untergrund/Unterbau-Indikator
Tz	Tragfähigkeitszahl
PMS	Pavement Management Systems

Formelverzeichnis

(2.1)	6
(2.2)	7
(2.3)	7
(2.4)	8
(2.5)	9
(2.6)	9
(2.7)	9
(2.8)	9
(2.9)	10
(2.10)	11
(2.11)	11
(2.12)	11
(2.13)	12
(2.14)	12
(2.15)	13
(2.16)	14
(2.17)	15
(7.1)	56
(7.2)	56
(7.3)	70
(9.1)	128
(9.2)	128
(9.3)	128
(9.4)	128

1 Einleitung

1.1 Problemstellung

Im Rahmen eines Pavement Management Systems (PMS) dient die Erfassung von Zustandsmerkmalen auf Netzebene und deren Bewertung zur vorausschauenden Planung von Erhaltungsmaßnahmen. Zur messtechnischen Zustandserfassung werden i.d.R. schnell fahrende Messsysteme eingesetzt, welche ohne große Beeinträchtigung des Verkehrs und in angemessener Zeit die Zustandsmerkmale erfassen können. Diese schnellfahrenden Messsysteme erfassen aber lediglich den Oberflächenzustand einer Straßenbefestigung. Um die Substanz einer Straßenbefestigung zu bewerten, sind Aussagen über die Tragfähigkeit erforderlich. Diese werden aber zurzeit im Rahmen eines PMS nicht erfasst, weil ein schnellfahrendes Messsystem zur Erfassung der Tragfähigkeit in Deutschland nicht zur Verfügung steht. Ein schnellfahrendes Messsystem namens High-Speed-Deflectograph (HSD) zur Erfassung der Tragfähigkeit wurde, bzw. wird in Dänemark entwickelt und dort, sowie in Großbritannien eingesetzt. Es dient in diesen Ländern aber nur zur qualitativen Bewertung der Tragfähigkeit auf Netzebene. Wird aufgrund der qualitativen Bewertung die Tragfähigkeit mit dem HSD (auf einzelnen Streckenabschnitten) als nicht ausreichend bewertet, erfolgt auf Objektebene eine detailliertere Beurteilung der Tragfähigkeit mit dem Falling-Weight-Deflectometer (FWD).

In Deutschland werden aufgrund des Oberflächenzustandes einer Straßenbefestigung die Streckenabschnitte ausgewählt, auf denen Erhaltungsmaßnahmen durchzuführen sind. Anschließend wird auf Objektebene die Erhaltungsmaßnahme geplant. Zur Planung und Optimierung von Erhaltungsmaßnahmen auf Objektebene sind umfangreiche Untersuchungen durchzuführen. In diesem Zusammenhang ist die Beurteilung der Tragfähigkeit von großer Bedeutung. Da aber ein quantitativer Bewertungshintergrund fehlt, wird die Tragfähigkeit bei der Planung von Erhaltungsmaßnahmen auf der Objektebene nicht mit einbezogen.

Die Erfassung der Tragfähigkeit einer Straßenbefestigung, einschließlich des Untergrundes/Unterbaues, nachfolgend Untergrund genannt, ist für eine vorausschauende Planung von Erhaltungsmaßnahmen und deren Kostenoptimierung erforderlich. Denn schon allein die Frage, ob eine Straßenbefestigung aufgrund ihrer Tragfähigkeit grundhaft erneuert werden muss oder nicht, lässt sich zurzeit schon aus den Er-

gebnissen von Tragfähigkeitsmessungen ableiten. Eine quantitative Bewertung der Tragfähigkeit ist zurzeit nicht möglich, da ein geeigneter Bewertungshintergrund fehlt. Vorhandene Bewertungshintergründe dienen nur der qualitativen Bewertung der Tragfähigkeit oder erlauben die quantitative Bewertung nicht in gewünschter Qualität. Um wie zuvor beschrieben eine Aussage über die Tragfähigkeit einer Asphaltstraßenbefestigung treffen zu können, ist aber ein quantitativer Bewertungshintergrund erforderlich.

1.2 Zielsetzung

Das Ziel dieser Arbeit ist die Schaffung eines qualitativen Bewertungshintergrundes zur Bewertung der Tragfähigkeit von Asphaltstraßenbefestigungen aufgrund von FWD-Messungen. Dazu ist es notwendig, die mit dem FWD gemessenen Deflexionsmulden hinsichtlich der Tragfähigkeit der Asphaltstraßenbefestigung zu interpretieren.

Dieser Bewertungshintergrund soll eine einfache und verständliche Einordnung der gemessenen Tragfähigkeit in ein vorgegebenes Bewertungsschema ermöglichen. Aufgrund dieses Bewertungsschemas wäre eine Aussage darüber möglich, ob eine Asphaltstraßenbefestigung hinsichtlich der vorhandenen Verkehrsbelastung ausreichend tragfähig ist oder nicht. Sollte die Tragfähigkeit der Asphaltstraßenbefestigung nicht ausreichend sein, kann anhand der quantitativen Bewertung die Erhaltungsmaßnahme geplant werden.

1.3 Arbeitsschritte

Nachfolgend sind die Schritte zur Erarbeitung des quantitativen Bewertungshintergrundes zur Bewertung der Tragfähigkeit von Asphaltstraßenbefestigungen aufgeführt:

- Literaturrecherche
 - Tragfähigkeit
 - Vorhandene Ansätze zur Bewertung der Tragfähigkeit einer Asphaltstraßenbefestigung

- Messverfahren zur Bestimmung der Tragfähigkeit (FWD)
 - Mehrschichtentheorie [9] (BISAR [55])
- Berücksichtigung der maßgebenden Einflussgrößen (Randbedingungen)
- Erarbeitung eines Lösungsansatzes zur Untergrundkorrektur (Berücksichtigung des Untergrund-E-Moduls)
 - Definition der Bettung
 - Festlegung eines Standard-Bettungsmoduls
 - Korrektur der gemessenen Deflexionsmulde auf den Standard- Bettungsmoduls
- Erarbeitung eines Ansatzes zur quantitativen Bewertung der Tragfähigkeit einer Asphaltstraßenbefestigung
 - Festlegung eines Bewertungsschemas (Tragfähigkeitsklassen)
 - Ansatz zur Einsortierung der gemessenen Deflexionsmulden ins Bewertungsschema
- Exemplarische quantitative Bewertung anhand von gemessenen Deflexionsmulden

2 Beanspruchung durch den Verkehr

Die aus dem Kraftfahrzeug (Kfz) resultierende Belastung wird durch das rollende Rad auf die Fahrbahnoberfläche übertragen. Sie wirkt auf ein Flächenelement der Fahrspur für den Bruchteil einer Sekunde ein. Die Impulsdauer wird durch die Geschwindigkeit des Fahrzeuges und die Länge der Auflagefläche des Reifens bestimmt. Mit zunehmender Fahrzeuggeschwindigkeit erhöht sich die Schwingungsfrequenz der Räder und der abgedeuteten Massen. Die Zeit des Angreifens der Belastung durch die Räder verkürzt sich und nähert sich der Zeit des Stoßes.[6][33][19]

In Abbildung 2.1 sind die Ergebnisse der Bestimmung dynamischer Durchbiegungen einer Straßenbefestigung dargestellt.[33]

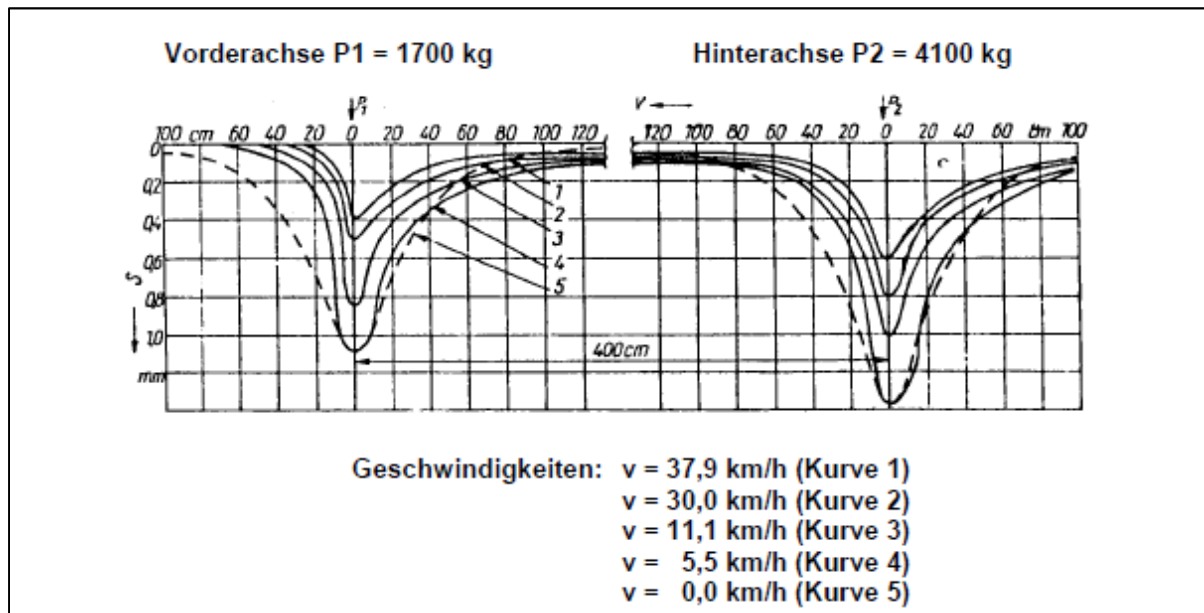


Abbildung 2.1: Dynamische Durchbiegung einer Straßenbefestigung [33]

Es wird deutlich, dass die Durchbiegungen der Straßenbefestigung mit Zunahme der Fahrgeschwindigkeit des Kfz abnehmen, da sich die Zeit der Belastungseinwirkung, bzw. die Zeit, welche für die volle Verwirklichung der Formänderung erforderlich ist, abnimmt. Der Krümmungsradius der Kurven unter statischer Belastung ist größer als der unter dynamischer Belastung. Dies gilt insbesondere im Abschnitt der Belastung und entspricht somit dem gefährlichsten Stadium bei der Überfahrt des Kfz.[33]

Bei der Wechselwirkung zwischen bewegtem Kraftfahrzeug und der Fahrbahnoberfläche entsteht ein dynamischer Spannungszustand in der Straßenbefestigung, der veränderlich in der Zeit und abhängig von der Geschwindigkeit und dem Gewicht des Fahrzeuges, sowie der Steifigkeit und Ebenheit der Straßenbefestigung ist. Der dy-

namische Spannungszustand der Straßenbefestigung besteht aus der Summe von zwei Spannungszuständen:[33][19]

- Der erste „quasistatische“ Spannungszustand wird durch eine stetige nicht abreißende Lageveränderung der Kraftfahrzeugräder auf der Oberfläche hervorgerufen. Der Anteil der Spannungen und Formänderungen verringert sich durch die Erhöhung der Geschwindigkeit des Kfz.
- Der zweite wellenförmige Spannungszustand entsteht durch den Stoß der sich losreißenden Räder des Kfz von der unebenen Fahrbahnoberfläche oder durch die Pulsation der Raddrücke bei der Schwingung des Kfz. Der wellenförmige Spannungszustand steigt mit zunehmender Geschwindigkeit des Kfz deutlich an und wird zur vorherrschenden Art der Formänderung.

In Abbildung 2.2 sind die aus den Kfz-Belastungen entstehenden Spannungen und Verformungen an der Fahrbahnoberfläche und in den einzelnen Schichten dargestellt.

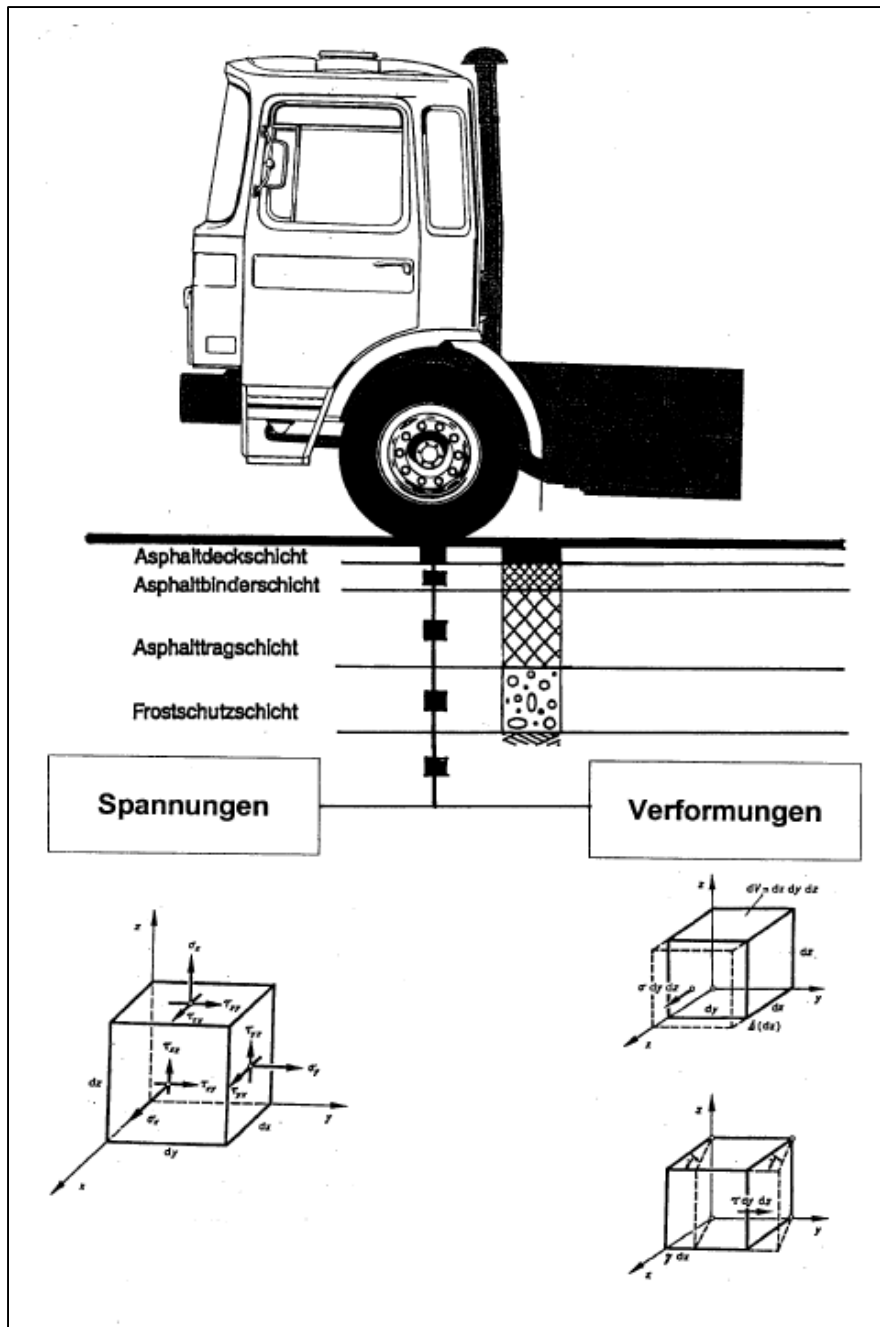


Abbildung 2.2: Spannungen und Verformungen infolge der Verkehrsbelastung [19]

An den Elementwürfeln treten Normalspannungen σ und Schubspannungen τ auf. Die Gleichgewichtsbedingungen für die Spannungen lauten [39][26]:

$$\begin{aligned}
 \frac{\delta \sigma_x}{\delta x} + \frac{\delta \tau_{yx}}{\delta y} + \frac{\delta \tau_{zx}}{\delta z} + X &= 0 \\
 \frac{\delta \tau_{xy}}{\delta x} + \frac{\delta \sigma_y}{\delta y} + \frac{\delta \tau_{zy}}{\delta z} + Y &= 0 \\
 \frac{\delta \tau_{xz}}{\delta x} + \frac{\delta \tau_{yz}}{\delta y} + \frac{\delta \sigma_z}{\delta z} + Z &= 0
 \end{aligned}
 \tag{2.1}$$

In diesen Gleichgewichtsbedingungen sind mit X, Y und Z die Komponenten der auf die Raumeinheit wirkenden Massenkräfte als Schwerkraft, Trägheitskraft und Dämpfungskraft bezeichnet.

Aus den Verschiebungen u, v und w in die x-, y- und z-Richtung folgen die Dehnungen ε und die Schiebungen (Gleitungen) γ :

Dehnungen

$$\begin{aligned}\varepsilon_x &= \frac{\delta u}{\delta x} \\ \varepsilon_y &= \frac{\delta v}{\delta y} \\ \varepsilon_z &= \frac{\delta w}{\delta z}\end{aligned}\tag{2.2}$$

Gleitungen

$$\begin{aligned}\gamma_{xy} &= \frac{\delta v}{\delta x} + \frac{\delta u}{\delta y} \\ \gamma_{xz} &= \frac{\delta w}{\delta y} + \frac{\delta v}{\delta z} \\ \gamma_{zx} &= \frac{\delta u}{\delta z} + \frac{\delta w}{\delta x}\end{aligned}\tag{2.3}$$

Mit Hilfe von Stoffgesetzen werden die Spannungen mit den Dehnungen und Gleitungen verknüpft. In Abbildung 2.3 sind beispielhafte Stoffgesetze als rheologische Modelle dargestellt.

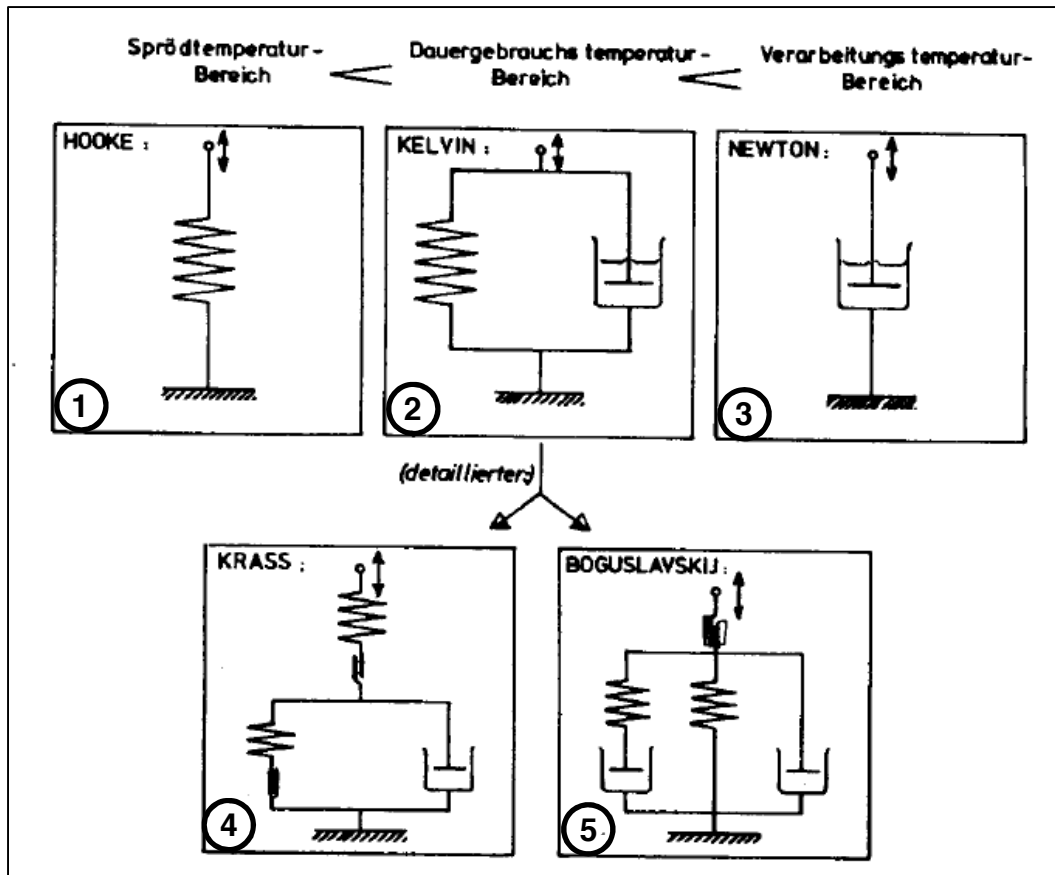


Abbildung 2.3: Stoffgesetze als rheologische Modelle [38]

Das Hooke'sche Gesetz (Elastizitätsgesetz) beschreibt das elastische Verhalten von Festkörpern, deren elastische Verformung proportional zur einwirkenden Belastung ist (linear-elastisches Verhalten). In Abbildung 2.3 ist das rheologische Modell für das Hooke'sche Gesetz als Feder-Modell dargestellt.

Das Elastizitätsgesetz für den dreidimensionalen Spannungs-Verformungs-Zustand, welcher in der Straßenbefestigung vorliegt, lautet unter der Annahme, dass für die einzelnen Schichten isotopes Materialverhalten vorliegt [39]:

$$\begin{aligned}
 \sigma_x &= \frac{E}{(1 + \mu) * (1 - 2 * \mu)} * ((1 - \mu) * \varepsilon_x + \mu * (\varepsilon_y + \varepsilon_z)) \\
 \sigma_y &= \frac{E}{(1 + \mu) * (1 - 2 * \mu)} * ((1 - \mu) * \varepsilon_y + \mu * (\varepsilon_z + \varepsilon_x)) \\
 \sigma_z &= \frac{E}{(1 + \mu) * (1 - 2 * \mu)} * ((1 - \mu) * \varepsilon_z + \mu * (\varepsilon_x + \varepsilon_y)) \\
 \tau_{xy} &= G * \gamma_{xy} \\
 \tau_{yz} &= G * \gamma_{yz} \\
 \tau_{zx} &= G * \gamma_{zx}
 \end{aligned}
 \tag{2.4}$$

Zwischen dem Elastizitätsmodul E , der Querdehnzahl μ und dem Schubmodul G besteht folgender Zusammenhang [39]:

$$G = \frac{E}{2 * (1 + \mu)} \quad (2.5)$$

Die drei elastischen Kennwerte sind somit durch eine Gleichung verknüpft und es kann stets eine der elastischen Konstanten eliminiert werden. Die Elastizitätstheorie für das isotrope Medium kann somit mit zwei elastischen Konstanten auskommen [39].

Werden die Spannungs-Dehnungs-Beziehungen (2.4) in die Gleichgewichtsbedingungen (2.1) eingesetzt, so werden unter Einführung des Laplace'schen Operators

$$\Delta = \frac{\delta^2}{\delta x^2} + \frac{\delta^2}{\delta y^2} + \frac{\delta}{\delta z^2} \quad (2.6)$$

und der Volumendilatation

$$e = \varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z + \frac{\delta u}{\delta x} + \frac{\delta v}{\delta y} + \frac{\delta w}{\delta z} \quad (2.7)$$

die Differenzialgleichungen der Verschiebung erhalten [26]:

$$\begin{aligned} \Delta u + \frac{1}{1 - 2 * \mu} * \frac{\delta e}{\delta x} + \frac{X}{G} &= 0 \\ \Delta v + \frac{1}{1 - 2 * \mu} * \frac{\delta e}{\delta y} + \frac{Y}{G} &= 0 \\ \Delta w + \frac{1}{1 - 2 * \mu} * \frac{\delta e}{\delta z} + \frac{Z}{G} &= 0 \end{aligned} \quad (2.8)$$

Für die Integration dieser Differentialgleichungen der Elastizitätstheorie ist mathematisch bisher noch kein analytisches Lösungsverfahren gefunden worden. Man hat sich deshalb bemüht, die Gleichungen zu vereinfachen. Das ist möglich, wenn hinsichtlich der Körperform und Belastung gewisse Symmetrieeigenschaften vorhanden sind. Auch bei nur zweidimensionalen (ebenen) Verhältnissen lassen sich die Aufgaben erheblich vereinfachen. Um zumindest zu angenäherten Ergebnissen zu kommen, hat man daher vielfach versucht, das anstehende Problem durch sinnvolle Voraussetzungen auf solche Fälle zurückzuführen. Die so gefundenen Lösungen sind

jedoch nur Spezialfälle. Bei ihrer Anwendung müssen die ihnen zugrunde liegenden Voraussetzungen eingehend abgewogen werden. Nach dem Vorliegen der Lösung der Differentialgleichungen können aus (2.2), (2.3) und (2.4) alle Spannungen und Verzerrungen durch Differenzieren berechnet werden.[19]

2.1 Dynamische Beanspruchung

Zur Beschreibung des Verhaltens der Straßenbefestigung unter dynamischen Belastungen müssen die masseabhängigen, inneren Trägheitskräfte berücksichtigt werden. In erster Linie interessieren die Reaktionen auf ortsveränderliche äußere Belastungen, aber auch die Ermittlungen für ortsfeste, zeitvariable Belastungen sind zwecks Vergleichs mit den statischen Berechnungen und den bei bewegten Vorgängen experimentell festgestellten Ergebnissen von praktischer Bedeutung. Die letztgenannten sind auch deshalb von Bedeutung, weil sie zur Aufklärung der Wirkungen von zeitlich ungleichförmigen bewegten Belastungen beitragen, wie sie durch Fahrbahnunebenheiten zustande kommen. Zur Berücksichtigung des zeitabhängigen Energietransportes müssen in die Gleichgewichtsbetrachtungen die am Volumenelement bei dynamischen Problemen auftretenden Trägheitskräfte direkt angebracht werden. [19] Ihre Komponenten im Sinne der Gleichgewichtsbedingungen (2.1) und der Differentialgleichungen der Verschiebungen (2.8) lauten [27]:

$$\begin{aligned} X &= -\rho * \frac{\delta^2 u}{\delta t^2} \\ Y &= -\rho * \frac{\delta^2 v}{\delta t^2} \\ Z &= -\rho * \frac{\delta^2 w}{\delta t^2} \end{aligned} \quad (2.9)$$

ρ = *Raumdicke der Masse*

Die Kräfte X, Y und Z sind die d'Alembert'schen Trägheitskräfte und sind definiert als das Produkt aus der Beschleunigung und der beschleunigten Masse. Diese Kraftgleichungen werden in die Differentialgleichungen der Verschiebungen (2.8) des Halbraumes eingesetzt. Die Lösung dieser Differentialgleichungen vereinfacht sich durch Überführen des dreidimensionalen Kontinuums in ein zweidimensionales Kontinuum.

Die Reaktionen zweidimensionaler, ebener, jeweils unendlich ausgedehnter Kontinua linearer Elastizität auf harmonische, vertikal gerichtete, zeitabhängige Linienlasten, haben MARGUERRE [35] und LAMB [34] analysiert. Bei dieser Analyse wird die x-z-Ebene betrachtet. Die Kraft ist in Richtung der y-Koordinate konstant.[19][27][16][20]

Eine Möglichkeit der zweidimensionalen Lösung der Differentialgleichungen bietet auch die Anwendung der Axialsymmetrie. Die Kraft besteht entweder aus einer zeitabhängigen Punktkraft oder einer über eine Kreisfläche verteilten Flächenkraft. Das Kontinuum erstreckt sich in radialer und vertikaler Richtung. Die Differentialgleichung lautet [16]:

$$\left[\frac{\mu E}{(1+\mu)(1-2\mu)} + 2G \right] \left(\frac{\delta^2 U}{\delta r^2} + \frac{1}{r} \frac{\delta U}{\delta r} - \frac{U}{r^2} + \frac{\delta^2 W}{\delta z * \delta r} \right) + G \left(\frac{\delta^2 U}{\delta z^2} - \frac{\delta^2 W}{\delta z * \delta r} \right) = \rho \frac{\delta^2 U}{\delta t^2} \quad (2.10)$$

$$\left[\frac{\mu E}{(1+\mu)(1-2\mu)} \right] \left(\frac{\delta^2 U}{\delta z \delta r} + \frac{1}{r} \frac{\delta U}{\delta z} + \frac{\delta^2 W}{\delta z^2} \right) - \frac{G}{r} \left(\frac{\delta U}{\delta z} - \frac{\delta W}{\delta r} \right) - G \left(\frac{\delta^2 U}{\delta z \delta r} - \frac{\delta^2 W}{\delta r^2} \right) = \rho \frac{\delta^2 W}{\delta t^2}$$

Die Lösung der beiden partiellen Differentialgleichungen erfolgt durch Einschalten von zwei Potentialfunktionen φ und Φ :

$$U = \frac{\delta \varphi}{\delta r} - \frac{\delta \Phi}{\delta z} \quad (2.11)$$

$$W = \frac{\delta \varphi}{\delta z} + \frac{\delta(r * \Phi)}{r * \delta r}$$

Mit den Potentialfunktionen werden die Verformung u in radialer Richtung r und die Verformung w in vertikaler Richtung z berechnet. Durch Einsetzen der Potentialgleichungen und deren Ableitungen in die partiellen Differentialgleichungen ergeben sich die nachfolgenden Wellengleichungen:

$$\frac{\delta^2 \varphi}{\delta r^2} + \frac{1}{r} \frac{\delta \varphi}{\delta r} + \frac{\delta^2 \varphi}{\delta z^2} = \frac{1}{v_p^2} \frac{\delta^2 \varphi}{\delta t^2} \quad (2.12)$$

$$\frac{\delta^2 \Phi}{\delta r^2} + \frac{1}{r} \frac{\delta \Phi}{\delta r} + \frac{\delta^2 \Phi}{\delta z^2} - \frac{1}{r^2} \Phi = \frac{1}{v_s^2} \frac{\delta^2 \Phi}{\delta t^2}$$

Es werden die transversalen, räumlichen Scher- oder Gleitwellen v_s und die longitudinalen, räumlichen Kompressions- oder Dilatationswellen v_p unterschieden. Die Verformung eines infinitesimal kleinen Teilchens und die Verschiebungen im Raum beim Durchgang einer Scherwelle und einer Kompressionswelle sind in Abbildung 2.4 dargestellt. Der Darstellung der Verschiebungen im Raum liegt eine sinusförmige Er-

regung zugrunde. Die beiden Wellenarten breiten sich in radialer Richtung aus. Bei der Scherwelle tritt keine Volumenänderung auf; bei der Kompressionswelle tritt dagegen sowohl Volumen- als auch Formänderung auf.

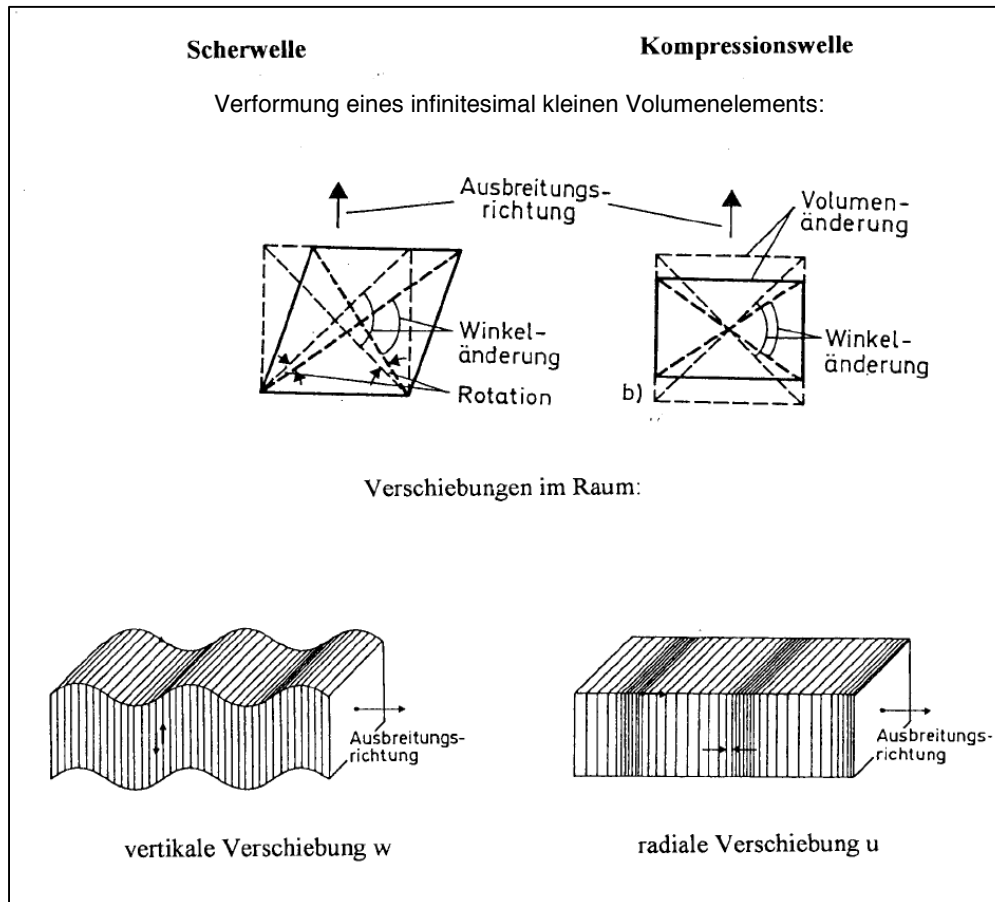


Abbildung 2.4: Verschiebungen eines infinitesimal kleinen Volumenelements und die Verschiebungen im Raum beim Durchgang einer Scherwelle und einer Kompressionswelle [28]

Die Fortpflanzungsgeschwindigkeiten der ungedämpften Grundwelle im isotrop-elastischen, unbegrenzten Kontinuum betragen für die Wellenarten:

Scherwelle:

$$v_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (2.13)$$

Kompressionswelle:

$$v_p = \sqrt{\frac{G}{\rho} * \frac{2 * (1 - \mu)}{1 - 2 * \mu}} \quad (2.14)$$

Die Geschwindigkeit der Kompressionswelle wird in einem inkompressiblem Medium mit der Querdehnzahl $\mu = 0,5$ unendlich groß [27].

Die allgemeine direkte Lösung von Wellengleichungen (2.12), die nur von den beiden Ortskoordinaten r und z abhängt, ist komplex und kann durch Anwendung der Laplace-Transformation sowie durch Trennung der Veränderlichen und Bessel-Funktionen [50] durchgeführt werden.[27] Die allgemeine Lösung der zweidimensionalen (axialsymmetrischen) Wellengleichungen durch Trennung der Veränderlichen und Bessel-Funktionen und der daraus abgeleiteten Gleichungen zur Berechnung der Verformungen u und w lauten [21][19]:

$$\begin{aligned} u &= K_{11} * J_1(K_{11} * r) * Z_1 * T_1 + K_{22} * J_1(K_2 * r) * Z_2 * T_2 \\ w &= K_{21} * J_0(K_1 * r) * Z_1 * T_1 + K_2 * J_0(K_2 * r) * Z_2 * T_2 \end{aligned} \quad (2.15)$$

mit:

$$T_1 = a_1 * \sin(K_1 * v_p * t) + \cos(K_{11} * v_p * t)$$

$$T_2 = a_3 * \sin(K_{12} * v_s * t) + \cos(K_{12} * v_s * t)$$

$$Z_1 = e^{-K_{21} * z}$$

$$Z_2 = e^{-K_{22} * z}$$

$$a_1, a_2, a_3, a_4, K_1, K_2, K_{11}, K_{12}, K_{21}, K_{22} = \text{Konstant}$$

$$J_0(K_1 * r), J_0(K_2 * r) = \text{Bessel-Funktion erster Art der Ordnung } 0$$

$$J_1(K_1 * r), J_1(K_2 * r) = \text{Bessel-Funktion erster Art der Ordnung } 1$$

$$V_s = \text{Geschwindigkeit der Scherwelle}$$

$$V_p = \text{Geschwindigkeit der Kompressionswelle}$$

Der Verlauf der Bessel-Funktionen in Abhängigkeit von der Variablen x , die im vorliegenden Fall den in den Klammern aufgeführten Produkten entspricht, ist in Abbildung 2.5 dargestellt.

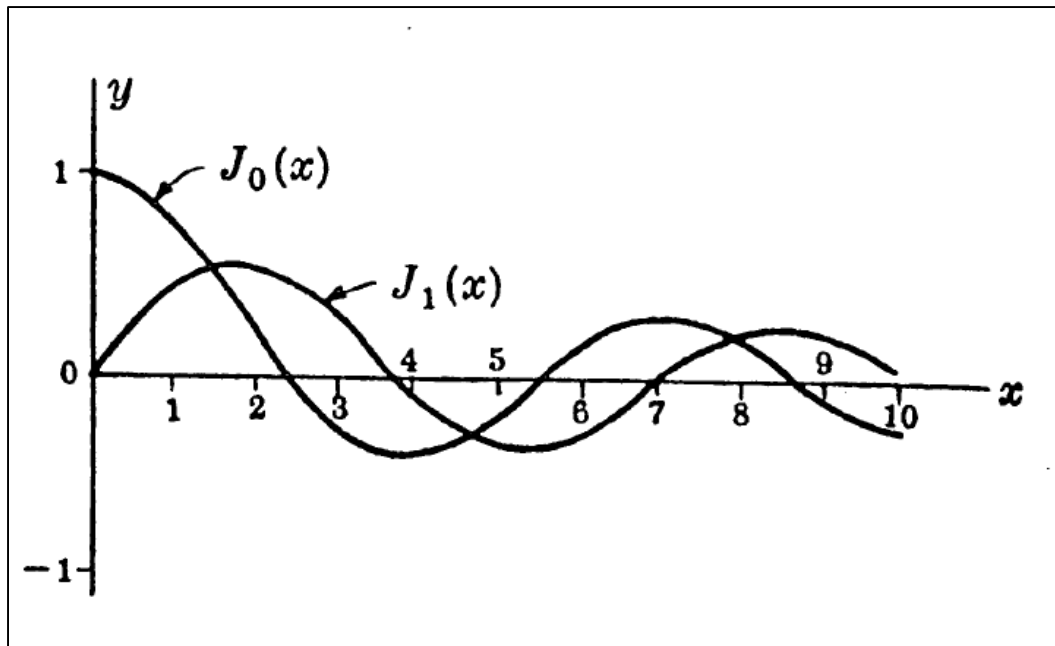


Abbildung 2.5: Verlauf der Bessel-Funktionen $J_0(x)$ und $J_1(x)$ [51]

Die Bessel-Funktionen oszillieren um die Abszisse und der Ordinatenwert nimmt mit steigendem Abszissenwert ab. Die Verformungen u und w nehmen daher in Abhängigkeit vom Abstand r zum Lasteintragungspunkt ab.[19]

Zur quantitativen Beschreibung der Abhängigkeit der beiden Verformungen von den Ortskoordinaten r und z sowie der Zeitkoordinate t müssen die in den Gleichungen enthaltenen Konstanten bestimmt werden. Die Ermittlung dieser Konstanten hängt von den Randbedingungen, welche im Halbraum und auf der Oberfläche des Halbraumes herrschen, ab. Da auf die Oberfläche des Halbraumes keine Spannungen aus Verschiebungen im Halbraum angreifen können, existiert eine spezielle Oberflächenwelle, welche mathematisch von Lord Rayleigh dargestellt wurde. Die Rayleigh-Welle entsteht aus der Interferenz von Schwerwellen und Kompressionswellen. Sie wird durch eine retrograde (d.h. entgegen der Wellenausbreitungsrichtung) elliptische Bewegung charakterisiert. Die Wellenlänge der Rayleigh-Welle berechnet sich aus folgender Gleichung [28]:

$$\lambda_R = \frac{v_R}{f}$$

mit:

V_R = Geschwindigkeit der Rayleigh-Welle

f = Frequenz

(2.16)

Zwischen der Geschwindigkeit der Rayleigh-Welle V_R und der Scherwelle V_s besteht folgender Zusammenhang [1]:

$$V_R = V_s * \frac{0,862 + 1,14 * \mu}{1 + \mu} \quad (2.17)$$

mit:

$\mu = \text{Querdehnziffer}$

Im Abbildung 2.6 ist der Verlauf der Verformungen u und w über die Tiefe z dargestellt. Auf der Ordinate ist das Verhältnis zwischen der Tiefe z und der Wellenlänge λ_R der Rayleigh-Welle aufgetragen.[19]

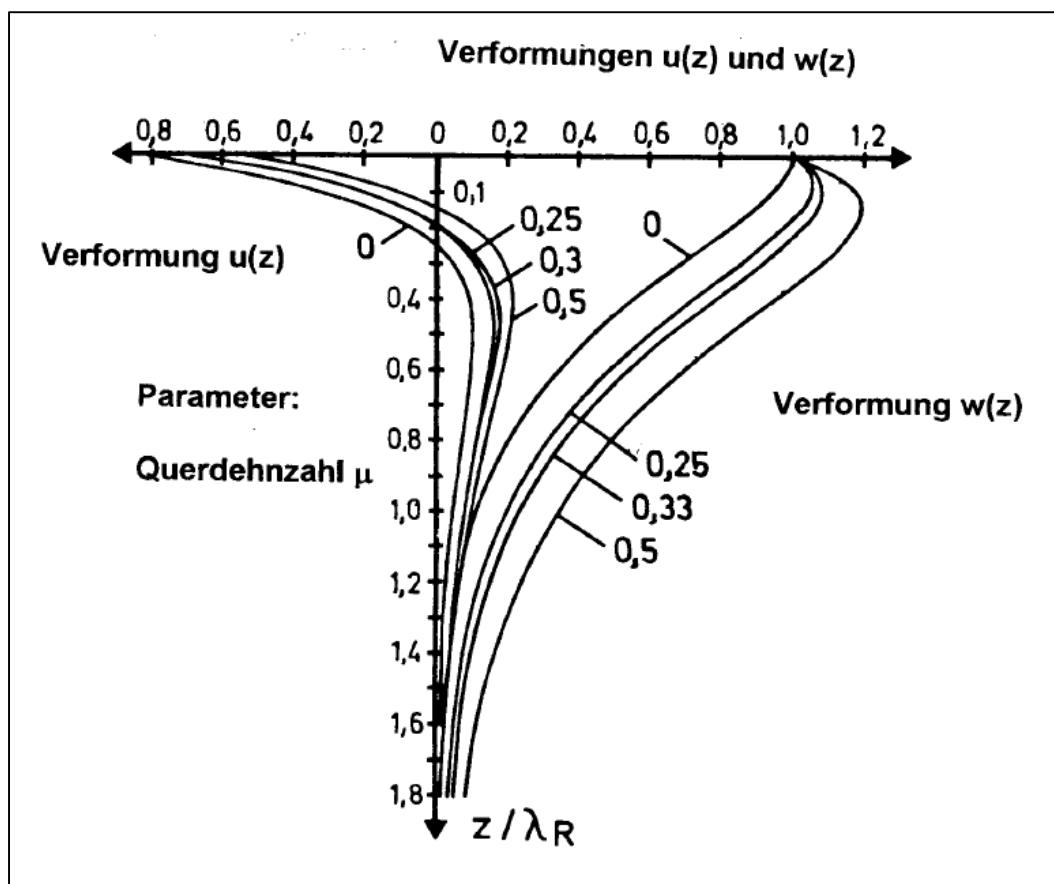


Abbildung 2.6: Verlauf der Verformung u und w über die Tiefe z [28]

Aus dem in Abbildung 2.6 dargestellten Verlauf der Kurven ist ersichtlich, dass die Verformungen mit zunehmender Tiefe abnehmen. Die radiale Verformung u der Kompressionswelle ändert in Abhängigkeit von der Querdehnzahl μ und dem Verhältnis z/λ_R das Vorzeichen.

Die Wellengleichungen (2.8) mit den Trägheitskräften (2.10) können durch Anwendung der Randelementmethode [48][37] gelöst werden. Lösungen der zweidimensio-

nalen Wellengleichungen, die entweder von den beiden Ortskoordinaten r und z (axialsymmetrisch) oder den beiden Ortskoordinaten x und z abhängen, sind für folgende Systeme in der Literatur [16][19][28][29][41][52] aufgeführt:[7]

- Elastisch isotroper Halbraum
- Inhomogener Halbraum
- Halbraum mit tiefenabhängigem Schubmodul
- Mehrschichtensysteme
- Halbraum mit Deckschicht

Eine Zusammenstellung der Wellentheorie und von für den Straßenbau relevanten Lösungen der zweidimensionalen Wellengleichungen sind in [20] enthalten.

2.2 Statische Beanspruchung

Die in der Straßenbefestigung von dynamischen Lasten mit Geschwindigkeiten bis zu 120 km/h hervorgerufenen Beanspruchungen (Normal- und Schubspannungen, Verzerrungen, Verschiebungen, Dehnungen und Gleitungen) können nach HÜRTGEN hinreichend genau durch rein statische Berechnungen ermittelt werden [27]. Die Beanspruchungen können nach [25] auf der Grundlage der Statik und der Elastizitätstheorie unter Ansatz einfachster Voraussetzungen, wie Homogenität, Isotropie und Linearität, hinreichend ermittelt werden. Bei der Anwendung der Berechnungsmodelle werden daher in der Regel statische Lasten, homogene, isotrope und linear elastische Strukturen, vorausgesetzt.[19]

Zurzeit werden die nachfolgenden Berechnungsmodelle als Befestigungs- und Strukturmodelle (Theorien) verwendet [25]:

- homogener Halbraum
- Platte auf elastischer Unterlage
- Mehrschichtentheorie
- Finite-Element-Modelle

2.3 Tragfähigkeit

Die Tragfähigkeit einer Asphaltbefestigung ist der mechanische Widerstand gegen eine kurzzeitige vertikale Verformung der Oberfläche. Die kurzzeitige Verformung

wird nachfolgend als Deflexion bezeichnet. Die Deflexion wird durch eine kurzzeitige Impulsbelastung, welche durch eine Überrollung des Straßenverkehrs verursacht wird, erzeugt, vgl. Abbildung 2.7. Die Belastungsdauer liegt je nach Fahrzeuggeschwindigkeit im Bereich von Millisekunden. Die Tragfähigkeit ist als die dynamische Steifigkeit ($C = P/w$) definiert.[1][2][8][45]

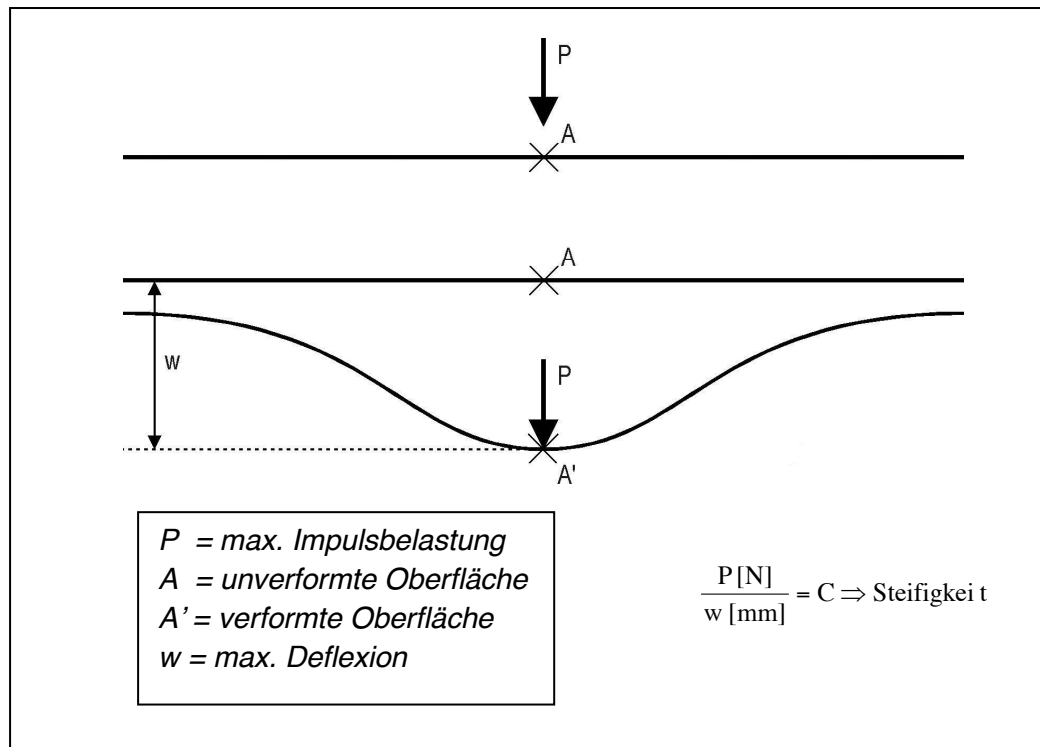


Abbildung 2.7: Reaktion einer Straßenbefestigung infolge einer aufgetragenen Belastung [45]

Die Tragfähigkeit einer Asphaltstraßenbefestigung wird von unterschiedlichen Randbedingungen beeinflusst.

- Temperatur innerhalb der Asphaltschichten
- Schichtdicken (Belastungsklasse), Baustoffe, Verdichtungsgrad
- Untergrund Tragfähigkeit

Die Tragfähigkeit einer Asphaltstraßenbefestigung wird zusätzlich durch den Zustand der Asphaltstraßenbefestigung (z.B. Risse) beeinflusst. Zur Herstellung einer dauerhaft tragfähigen Asphaltstraßenbefestigung werden Anforderungen an die einzelnen Schichten und die Ausführung der Asphaltstraßenbefestigung gestellt.

Die Tragfähigkeit der Asphaltstraßenbefestigung nimmt im Laufe der Nutzungsdauer ab. Die Nutzungsdauer der Asphaltstraßenbefestigung lässt sich entsprechend ihrem elastischen und plastischen Verformungsverhalten in unterschiedliche „Betriebsphasen“ untergliedern:[19]

- I. Bauphase
 - I.1 Einbau und Verdichtung des Materials (Nullzustand für das Material)
 - I.2 Einbau und Verdichtung der nächsten Befestigungsschichten
 - I.3 Liegezeit bis zur Verkehrsübergabe (Nullzustand für die Gesamtbefestigung)
- II. Konsolidierungsphase
- III. Beharrungsphase
- IV. Ermüdungsphase

Zur Bestimmung der Tragfähigkeit existieren unterschiedliche quasi-statische und dynamische Messverfahren. Hierzu werden insbesondere die nachfolgenden Messverfahren eingesetzt:

- Benkelman-Balken (quasi-statisches Messverfahren)
- Falling-Weight-Deflectometer (FWD) (dynamisches Messverfahren)
- High-Speed-Deflectograph (HSD) / Traffic-Speed-Deflectometer (TSD) (dynamische Messverfahren)
- Curviametro (dynamisches Messverfahren)

Eine detaillierte Übersicht und Beschreibung der Messverfahren zur Ermittlung der Tragfähigkeit enthält die Habilitation von GRÄTZ[19].

3 Falling-Weight-Deflectometer (FWD)

Die Tragfähigkeit von Asphaltstraßenbefestigungen wird im Rahmen dieser Arbeit mit Hilfe der Messergebnisse aus Falling-Weight-Deflectometer (FWD) Messungen quantitativ bewertet. Das in den 1960er Jahren in Frankreich und Dänemark entwickelte FWD wurde in Deutschland im Jahr 1996 eingeführt. Die Einführung erfolgte im Rahmen des Forschungsvorhabens „Begleitende Forschung zur Einführung des Falling-Weight-Deflectometer (FWD) in der Bundesrepublik Deutschland“ [8]. In Abbildung 3.1 ist das FWD (Firma Dynatest, Typ 8000) des Instituts für Straßenbau und Verkehrswesen der Universität Duisburg-Essen dargestellt.[31][17]



Abbildung 3.1: FWD der Universität Duisburg-Essen (Firma Dynatest, Typ 8000)

Das FWD ist ein dynamisches Messgerät, bei dem über eine Lastplatte ein Kraftimpuls auf die Oberfläche der Straßenbefestigung aufgebracht wird, vgl. Abbildung 3.2. Der Kraftimpuls wird durch eine Fallmasse, welche aus einer frei wählbaren Höhe auf einen Gummipuffer (Feder-Dämpfer-System) herabfällt, erzeugt. Mit einer Kraftmessdose wird der zeitliche Verlauf des Kraftimpulses erfasst, vgl. Abbildung 3.3. Der vom FWD erzeugte Kraftimpuls dient zur Simulation einer Radüberrollung und sollte aus diesem Grund die gleiche Impulsdauer aufweisen, die durch die Radüberrollung mit einem Fahrzeug entsteht (Impulsdauer zwischen 25 ms und 30 ms). Die Anzahl und die Härte der Gummipuffer (mindestens 45 Shore) müssen so zu wählen sein, dass für jede Fallhöhe eine Belastungszeit von 25 bis 30 ms erzeugt wird. Die Größe des Kraftimpulses sollte der Radlast eines Lastkraftwagens entsprechen und somit 50 kN betragen. Zur gleichmäßigen Einleitung des Kraftimpulses und zur besseren Anpassung an die Straßenoberfläche ist die Lastplatte segmentiert und besitzt eine ca. 5 mm dicke Gummipatte an ihrer Unterseite. Der Durchmesser der Lastplat-

te beträgt 300 mm. Die kurzzeitige vertikale Verformung der Fahrbahnoberfläche (Deflexionsmulde) als dynamische Reaktion auf den Kraftimpuls wird von Geofonen aufgenommen.[36]

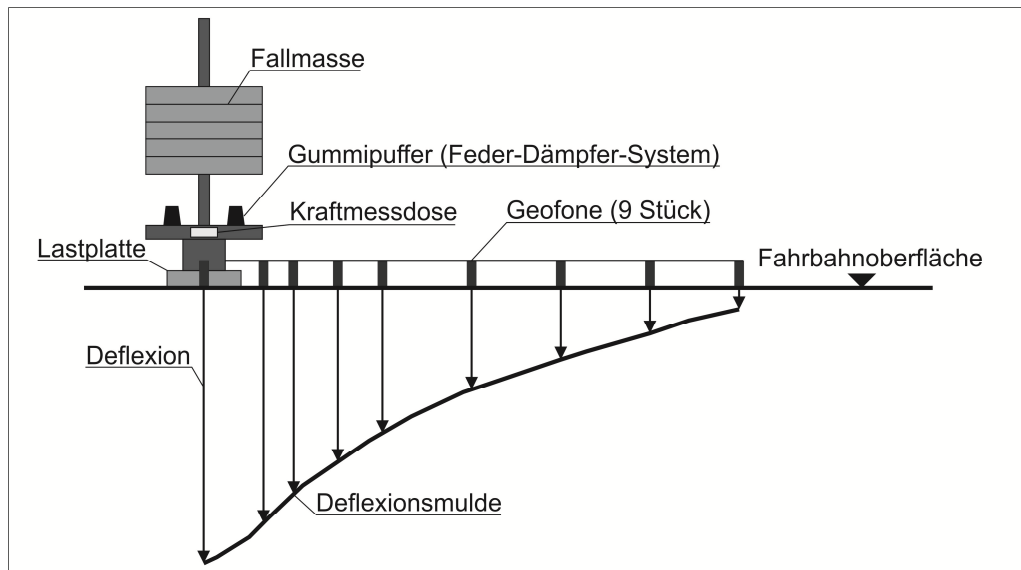


Abbildung 3.2: Messprinzip des Falling-Weight-Deflectometer (FWD)[3]

Geofone sind Sensoren, mit denen die Schwinggeschwindigkeit, d.h. im Fall des FWD die vertikale Geschwindigkeit der Straßenbefestigung an deren Oberfläche, in Abhängigkeit von der Zeit gemessen wird. Die Geofone bestehen im Wesentlichen aus einer Spule und einem Permanentmagneten, welche durch eine Feder gekoppelt sind (Feder-Masse-System). Die Fahrbahnoberflächenbewegung führt zu einer Relativbewegung zwischen Spule und Permanentmagneten, welche durch Induktion proportional zur Geschwindigkeit eine Spannung erzeugt. Durch Integration der so ermittelten Deflexionsgeschwindigkeit über die Zeit wird die Deflexion berechnet.[45][19] Die Theorie des FWD-Verfahrens wurde von Straube et al. [8] beschrieben, vgl. Anlage 6.

Ein Geofon befindet sich im Lastzentrum, die anderen acht Geofone sind in bestimmten Abständen vom Lastzentrum entfernt angeordnet. Im Rahmen dieser Arbeit werden die in [3] empfohlen Geofonabstände verwendet und mit D_i (i = Abstand zum Lastzentrum (Geofon) in mm) eindeutig bezeichnet:

D_0 [mm] Deflexion im Lastzentrum

D_{200} [mm] Deflexion am Abstand von 200 mm zum Lastzentrum

D_{300} [mm] Deflexion am Abstand von 300 mm zum Lastzentrum

D_{450} [mm] Deflexion am Abstand von 450 mm zum Lastzentrum

D_{600} [mm] Deflexion am Abstand von 600 mm zum Lastzentrum

D_{900} [mm] Deflexion am Abstand von 900 mm zum Lastzentrum

D_{1200} [mm] Deflexion am Abstand von 1.200 mm zum Lastzentrum

D_{1500} [mm] Deflexion am Abstand von 1.500 mm zum Lastzentrum

D_{1800} [mm] Deflexion am Abstand von 1.800 mm zum Lastzentrum

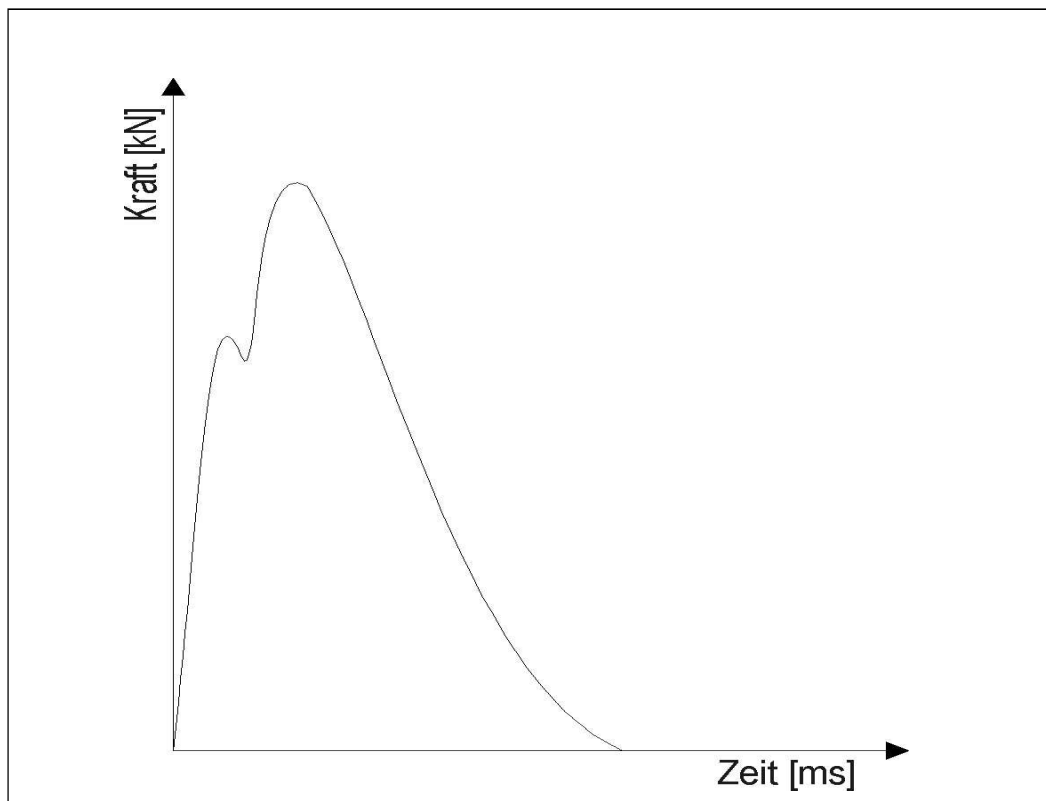


Abbildung 3.3: Kraftimpuls beim Falling-Weight-Deflectometer (FWD), Prinzipskizze [45]

Die gesamte Messkette besteht aus 10 Kanälen, wobei die Kanäle 1 bis 9 die Signale von Geofon 1 (im Lastmittelpunkt) bis Geofon 9 und der Kanal 10 das Signal der Kraftmessdose erfasst. Die Kanäle werden in der Reihenfolge 1 bis 10 nicht zeitgleich sondern zeitverschoben abgetastet; die Zeitverschiebung zwischen zwei Kanälen beträgt $19,55 \mu\text{s}$. Zwischen dem Kanal 1 und dem Kanal 10 tritt eine Zeitverschiebung von $175,95 \mu\text{s}$ auf. Aus den mit den Geofonen aufgenommenen Geschwindigkeits-Zeit-Verläufen wird durch Integration der Verformungs-Zeit-Verlauf berechnet.[19][40] In Abbildung 3.4 ist exemplarisch der Kraft-Zeit- und der daraus resultierende Verformungs-Zeit-Verlauf dargestellt [5][23][24].

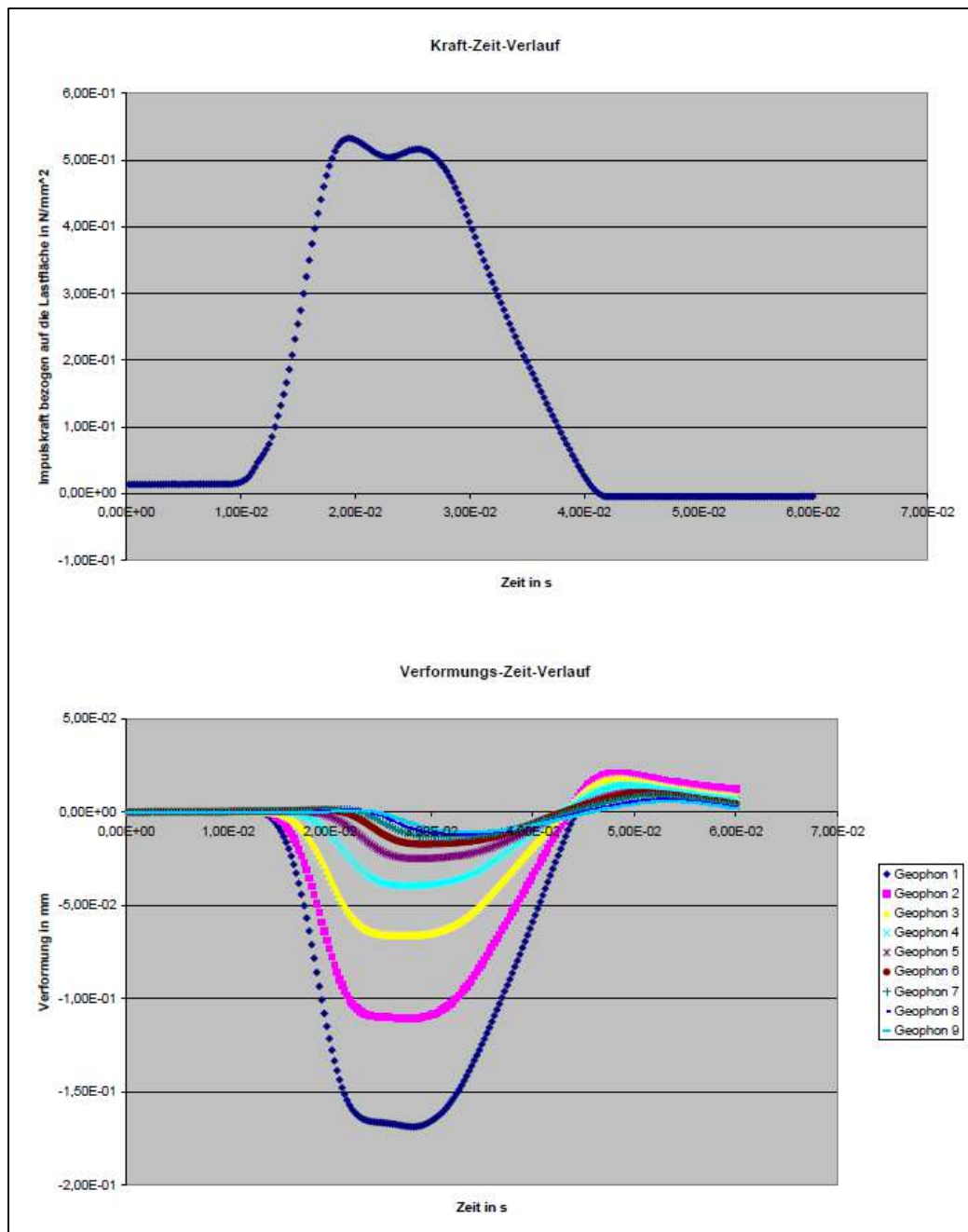


Abbildung 3.4: Kraft-Zeit- und Verformungs-Zeit-Verlauf beim FWD [5][21][22]

Aus Abbildung 3.4 ist ersichtlich, dass das Messfenster 60 ms beträgt; der gesamte Schwingungsvorgang der Fahrbahnoberfläche bzw. die gesamte Wellenfortpflanzung werden somit nicht erfasst. Das Messfenster kann jedoch nach [40] nicht vergrößert werden, da das zurückprallende Fallgewicht nicht aufgefangen wird und somit zumindest ein Doppelimpuls entsteht. Aus den Verformungs-Zeit-Verläufen der Fahrbahnoberfläche in verschiedenen Abständen vom Lastflächenmittelpunkt werden die Maximalwerte der Verformung herausortiert und im Abstand vom Lastflächenmittelpunkt (Deflexionsmulde) dargestellt.[19]

Die Messung der Tragfähigkeit auf Asphaltstraßenbefestigungen erfolgt in Deutschland in der Regel gemäß dem FGSV Arbeitspapieren Tragfähigkeit[3]. Es werden je Messpunkt mindestens zwei Lastschläge mit einer Last von 50 kN, in der Regel drei Lastschläge, eingeleitet. Während der Messsequenz wird überprüft, ob die gemessenen Deflexionen und die aufgebrachte Last sich innerhalb der im FGSV Arbeitspapieren Tragfähigkeit[3] festgelegten Toleranzbereich von 5 % befinden. Systembedingt kommt es zu geringen Abweichungen bei der Größe des aufgebrachten Lastimpulses. Die gemessenen Deflexionen werden daher auf die gewünschte Last von 50 kN rechnerisch lastkorrigiert. Da die Abweichungen nur gering sind, ist die Lastkorrektur durch lineare Interpolation zulässig. Der Messpunktabstand sollte in der Regel 25 m betragen, kann aber je nach Aufgabenstellung und Kenntnis der örtlichen Verhältnisse verändert werden. Der Ablauf einer Messsequenz besteht aus dem Herablassen der Lastplatte und des Geofonbalkens, einen Setzungsschlag, den Lastschlägen und dem anschließenden Anheben der Lastplatte und des Geofonbalkens. Die Dauer einer Messsequenz ist vom FWD-Typ und der aufgezeichneten Datenmenge abhängig. Die Messpunkte liegen nach [3] in der rechten Rollspur des Fahrstreifens. Während der gesamten Messung ist ein Feldbuch über Wetter, Oberflächenmerkmale und sonstige Besonderheiten zu führen. Für die spätere Temperaturkorrektur ist die aktuelle Asphaltkörpertemperatur in 5 cm Tiefe nach JANSEN zu messen.[31]

Die Oberbautemperatur hat einen großen Einfluss auf die Größe der gemessenen Deflexionen und somit auf die Tragfähigkeit der Asphaltstraßenbefestigung. Um die gemessenen Deflexionen untereinander vergleichen zu können, müssen Standardbedingungen für die Oberbautemperatur vorliegen. Neben der Oberbautemperatur müssen noch weitere Standardbedingungen wie die Lastgröße, die Impulsdauer und die Geofonposition eingehalten werden. Da die Standardbedingungen für die Oberbautemperatur während der Messung in der Regel nicht vorliegen, muss eine Temperaturkorrektur der Deflexionen auf eine Standardoberbautemperatur vorgenommen werden. Die Temperaturkorrektur erfolgt nach JANSEN [31] auf eine Standardoberbautemperatur von 20°C.

Für die Auswertung werden je Messpunkt die last- und temperaturkorrigierten Deflexionen als Deflexionsmulde für jeden Messpunkt, als Deflexionsprofil im Lastzentrum und als Deflexionsprofil am letzten Geofon dargestellt, vgl. Diagramm 3.1 und Diagramm 3.2. In Diagramm 3.2 sind zusätzlich die Fehlerbalken (Fehlerindikatoren) für den Toleranzbereich von 5 % des FWD und die Trendlinien dargestellt. Es wird deut-

lich, dass die dargestellten Abweichungen zwischen den einzelnen Messpunkten nicht im Toleranzbereich des FWD liegen, sondern durch die Inhomogenität der Strecke hervorgerufen werden.

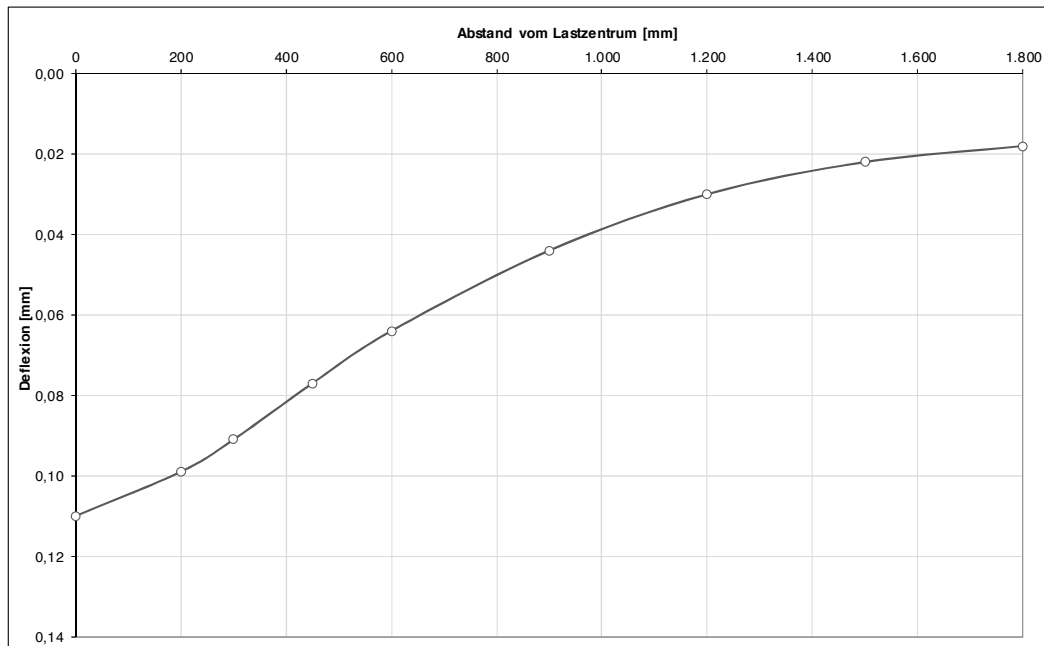


Diagramm 3.1: Darstellung der FWD Messwerte als Deflexionsmulde

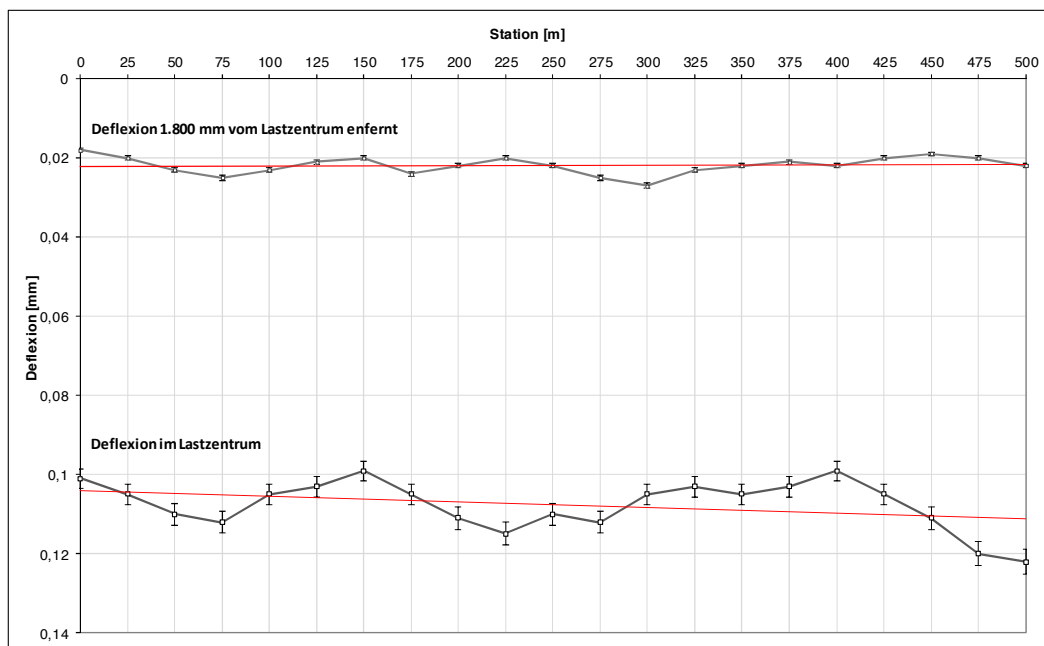


Diagramm 3.2: Deflexionsprofil der Deflexion im Lastzentrum (D_0) und Deflexion 1.800 mm vom Lastzentrum (D_{1800}) entfernt

4 Mehrschichtentheorie

Die Mehrschichtentheorie ermöglicht die Berechnung des Spannungs-Verformungs-Zustandes in einer Asphaltstraßenbefestigung und ist eine Weiterentwicklung des Modells „Homogener Halbraum“ (Halbraumtheorie). Die Mehrschichtentheorie wurde von BURMISTER [9] im Jahre 1945 an Hand eines Zwei-Schichten-Systems aufgestellt. In den folgenden Jahren entwickelte er seine Theorie weiter für ein Drei-Schichten-System. Die Mehrschichtentheorie setzt voraus, dass alle Schichten einer Straßenbefestigung homogen, isotrop, linear-elastisch, masselos und seitlich unendlich ausgedehnt sind. Diese Voraussetzung gilt sowohl für die Schichten des Oberbaus, als auch für den Untergrund, der als linear-elastischer Halbraum betrachtet wird. Die Schichten liegen auf dem Halbraum auf, wobei ihr Eigengewicht vernachlässigt wird. Jede Schicht ist durch den E-Modul E und die Querdehnzahl μ gekennzeichnet. Der Schichtenverbund kann berücksichtigt werden. Die Berechnungen basieren auf der Elastizitätstheorie, wobei die Spannungen und Verformungen entsprechend dem Hooke'schen Gesetz proportional sind. Die Spannungen und Verformungen nehmen mit zunehmender Tiefe ab und tendieren gegen den Grenzwert Null. Die Belastung wirkt statisch und wird über eine Kreisfläche als eine konstante Kontaktpannung an der Fahrbahnoberfläche in die Straßenbefestigung eingeleitet.

Für die Mehrschichtentheorie werden die folgenden Eingabegrößen benötigt:

n	=	<i>Anzahl der Schichten</i>
E_n	=	<i>E-Modul der Schicht n</i>
ν_n	=	<i>Querkontraktionszahl der Schicht n</i>
h_n	=	<i>Dicke der Schicht n</i>
a	=	<i>Radius der Reifenaufstandsfläche</i>
p	=	<i>Reifenkontaktpressung</i>

Die Bestimmung diese Eingangsgrößen bedarf besonderer Erfahrungen, da sie von den jeweiligen Schichtmaterial und den zugehörigen Randbedingungen wie Temperatur, Feuchtigkeitsgehalt abhängig sind.[45]

Der prinzipielle Aufbau, die erforderlichen Eingangsgrößen und die berechenbaren Beanspruchungen des Mehrschichtenmodells sind in Abbildung 4.1 dargestellt.

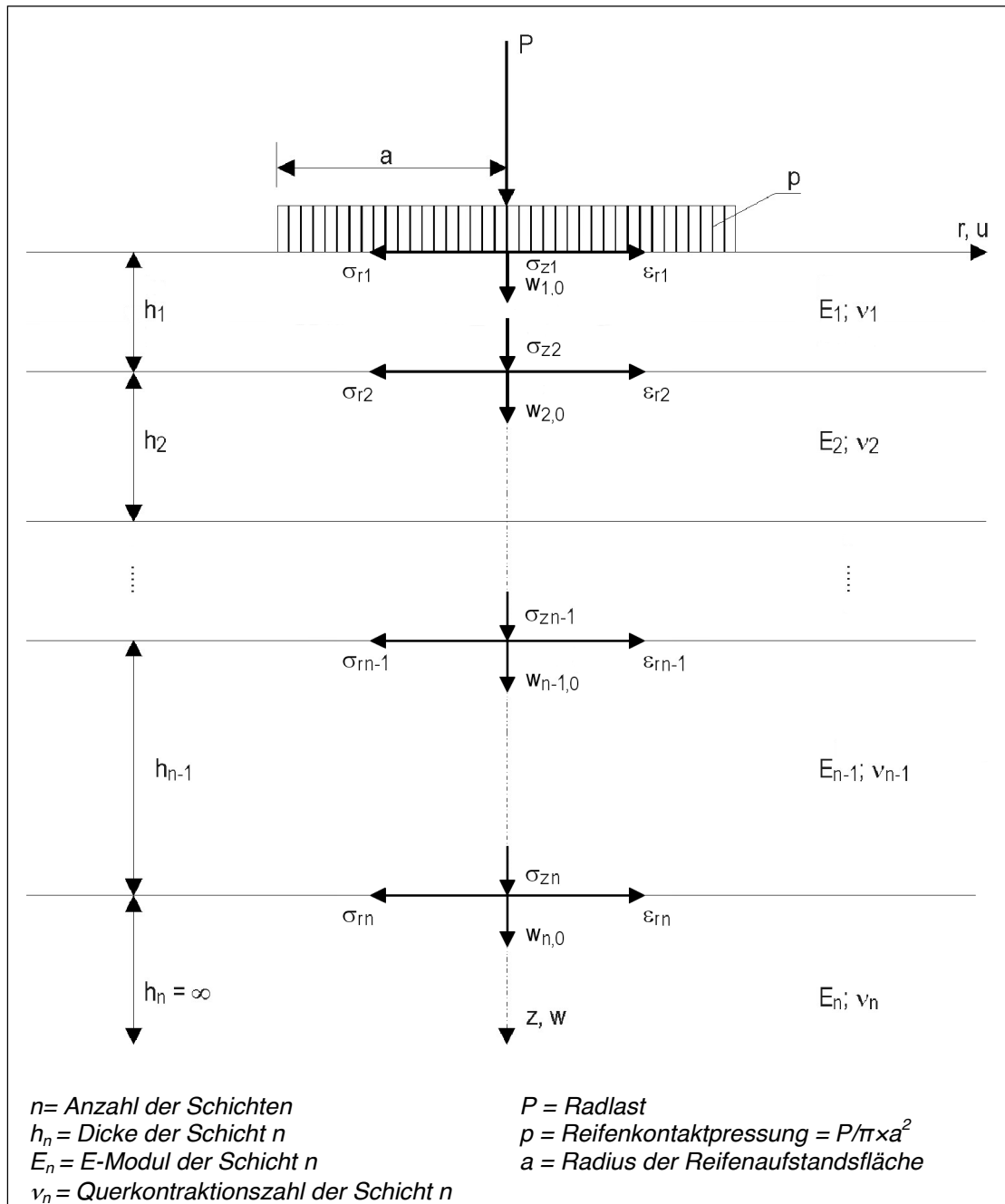


Abbildung 4.1: Beanspruchungen im Mehrschichtenmodell, Prinzip [45]

Die numerische Lösung der Spannungs-, Dehnungs- und Verzerrungszustände infolge einer aufgebrachten Last erfolgt in Mehrschichtenprogrammen über eine rotationssymmetrische Formulierung des Mehrschichtenmodells. Die Spannungskomponenten an einem Raumelement in Zylinderkoordinaten bei Axialsymmetrie sind in Abbildung 4.2 dargestellt. Infolge der Normal- und Schubspannungen entstehen an dem Raumelement die Verformungen u , v und w in r , δ und z Richtung.

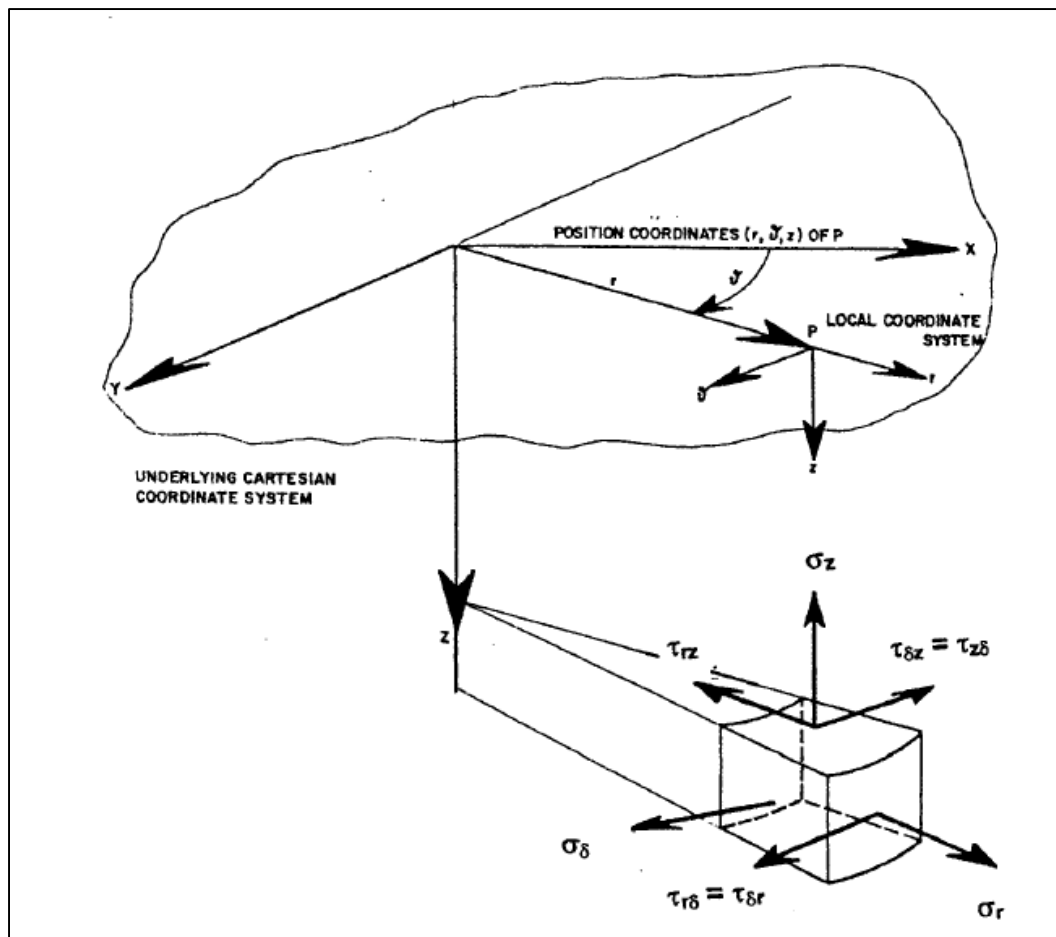


Abbildung 4.2: Spannungskomponenten an einem Raumelement in Zylinder-Koordinaten [12]

Die Berechnung der Beanspruchungsgrößen erfolgt über die Lösung von zwei partiellen Differentialgleichungen. Die Lösung dieses Gleichungssystems erfolgt durch die Fourier-Reihenentwicklung und die Hankel-Transformation, indem bestimmte Rand- und Übergangsbedingungen an der Fahrbahnoberfläche, in den Schichtgrenzen und am Übergang zum Halbraum berücksichtigt werden.[12]

Mit Mehrschichtenprogrammen können in der Regel mehrere gleichzeitig wirkende Radlasten berücksichtigt werden, wobei die Reifenaufstandsflächen und Kontaktpressungen unabhängig voneinander gewählt, sowie gleichzeitig Vertikal- und Horizontallasten angesetzt werden können. Die Reaktionen des Mehrschichtensystems auf die angesetzten Lasten können für jeden beliebigen Ort des Systems in X-, Y- und Z-Richtung in Form von Spannungen, Dehnungen und Verschiebungen (Beanspruchungsgrößen) ermittelt werden. Die mit der Mehrschichtentheorie berechneten Beanspruchungsgrößen sind mit denen in der Straßenbefestigung gemessenen Beanspruchungsgrößen ausreichend genau verifizierbar. Da in Mehrschichtensystemen nur statisch wirkende Lasten berücksichtigt werden können, muss insbesondere für

Asphaltschichten die Abhängigkeit der Beanspruchungsreaktionen von der Lasteinwirkungszeit und der Temperatur beachtet werden. Dies erfolgt in der Weise, dass der frequenz- und temperaturabhängige effektive E-Modul des Asphaltes für eine bemessungsrelevante Temperatur ermittelt wird.[45]

Die Mehrschichtentheorie wird im Rahmen dieser Arbeit genutzt, um Deflexionen, bzw. Deflexionsmulden zu berechnen. Den Nachweis, dass eine Berechnung von Deflexionsmulden, bzw. eine Auswertung von Deflexionsmulden mit Hilfe von Mehrschichtenrechnungen zulässig ist, soweit die Deflexionen in bestimmten Größenordnungen liegen, hat HÜRTGEN [8] bereits 1991 erbracht. Voraussetzung ist, dass in das Mehrschichtenprogramm dynamische E-Moduln der einzelnen Schichten eingegeben werden.[22][49]

Für die nachfolgend durchgeführten Berechnungen wird das Programm BISAR (Bitumen Structure Analysis in Roads) [55] der Firma Shell AG verwendet. Mit dem Programm können auf Grundlage der Mehrschichtentheorie die Dehnungen, Spannungen und Verschiebungen an beliebigen Punkten eines Mehrschichtensystems berechnet werden. Es berücksichtigt sowohl vertikale, als auch horizontale Lasten und den Verbund zwischen den Schichten. Die Mehrschichtenrechnungen können an einem bis zu zehn Schichten bestehenden Mehrschichtensystem durchgeführt werden. Das Mehrschichtensystem kann durch eine oder mehrere Kreisrunde statische Lasten auf der Systemoberseite (Straßenoberfläche) belastet werden. Das Materialverhalten von Asphalt wird über den frequenz- und temperaturabhängigen E-Modul der jeweiligen Schicht beschrieben. Der Schichtenverbund zwischen den Schichten kann im BISAR-Programm berücksichtigt werden.

Nachfolgend sind die erforderlichen Eingangsparameter der Mehrschichtenrechnung mit BISAR aufgeführt:

- Anzahl der Schichten
- Belastung
- E-Modul je Schicht
- Dicke je Schicht
- Querkontraktionszahl je Schicht
- Reifenaufstandsfläche (Radius)
- Größe und der Ort (x- und y-Koordinate) der Kontaktpressung
- Beliebig viele Abfragepunkte

5 Ansätze zur Bewertung der Tragfähigkeit einer Asphaltstraßenbefestigung

Die in Deutschland genutzten Ansätze zur Bewertung der in Abschnitt 2.3 beschriebenen Tragfähigkeit von Asphaltbefestigungen werden in der Habilitationsschrift von GRÄTZ [22] detailliert beschrieben. Nachfolgend werden die zwei bekanntesten Ansätze zur Bewertung der Tragfähigkeit von Asphaltbefestigungen anhand von FWD-Messungen in Deutschland beschrieben. Wie im Abschnitt 1 beschrieben, dienen die nachfolgenden Bewertungshintergründe nur der qualitativen Bewertung der Tragfähigkeit oder erlauben die quantitative Bewertung nicht in gewünschter Qualität. Daher ist die Erarbeitung eines quantitativen Bewertungshintergrundes für Asphaltbefestigungen weiterhin erforderlich.

5.1 Jendia

Einen Ansatz zur Bewertung der Tragfähigkeit von Asphaltstraßenbefestigung liefert JENDIA in seiner Arbeit „Bewertung der Tragfähigkeit von bituminösen Straßenbefestigungen“[32].

In seiner Arbeit nutzt JENDIA zur Bewertung der Tragfähigkeit eine Tragfähigkeitszahl T_z und einen Untergrund/Unterbau-Indikator UI (UI-Wert). Wobei die Tragfähigkeitszahl T_z zur Bewertung der Tragfähigkeit der gesamten Straßenbefestigung und der UI-Wert zur Bewertung der Tragfähigkeit des Untergrundes dient.

Die Tragfähigkeitszahl T_z wird gemäß Gleichung 5.1 berechnet.

$$T_z = \frac{R_0}{d_1} \quad [-] \quad \text{Gleichung 5.1}$$

mit:

T_z $[-]$ Tragfähigkeitszahl

R_0 $[m]$ Krümmungsradius in der Lastachse der Deflexionsmulde

d_1 $[\mu m]$ Deflexion im Lastzentrum der Deflexionsmulde

In Gleichung 5.1 nutzt JENDIA den Zusammenhang aus der elementaren Balkentheorie zwischen der Biegesteifigkeit eines Balkens und dem sich ergebenden Krümmungsradius R_0 , der sich aufgrund einer konstanten Last einstellt. Diese Abhängigkeit nutzt JENDIA, um über den Krümmungsradius R_0 in der Lastachse die Tragfähigkeit der Straßenbefestigung beurteilen zu können. Der Krümmungsradius R_0 in

der Lastachse ergibt sich laut JENDIA aus der Deflexionsdifferenz am Lastzentrum und an der Geofonposition 300 mm und wird nach Gleichung 5.2 berechnet.

$$R_0 = a \times (d_{12})^b \quad [m] \quad \text{Gleichung 5.2}$$

mit:

R_0 [m] Krümmungsradius in der Lastachse der Deflexionsmulde

d_{12} [μm] Deflexionsdifferenz: $D_0 - D_{300}$

Um über die Tragfähigkeitszahl T_z eine Aussage über die Tragfähigkeit der gesamten Straßenbefestigung treffen zu können, hat JENDIA einen Grenzwert ($T_z > 0,75$) festgelegt. Dieser Grenzwert wurde anhand von FWD-Messungen auf unterschiedlichen Teststrecken (Bauklasse III) festgelegt. Liegt die berechnete Tragfähigkeitszahl T_z unter diesem Grenzwert, gilt die Tragfähigkeit der gesamten Straßenbefestigung als nicht ausreichend tragfähig.

Der UI-Wert wird nach JENDIA aus der Deflexionsdifferenz am Geofon 900 mm und 1500 mm berechnet. Da diese Geofonabstände nicht bei jedem FWD-System gegeben sind, hat JENDIA einen Zusammenhang zwischen den Untergrund E-Modul E_3 und dem UI-Wert hergeleitet. Somit lässt sich der UI-Wert gemäß Gleichung 5.3 berechnet.

$$UI = \frac{1}{a + b \times E_3} \quad [\mu m] \quad \text{Gleichung 5.3}$$

$$a = -0,000198$$

$$b = 0,000154$$

mit:

UI [μm] Untergrund/Unterbau-Indikator

E_3 [MN/m²] E-Modul des Untergrundes bzw. Unterbaues

Wie schon bei der Tragfähigkeitszahl T_z wurde auch für den UI-Wert ein Grenzwert ($UI > 0,07$ mm) zu Beurteilung der Tragfähigkeit des Untergrunds festgelegt. Der festgelegte Grenzwert entspricht einem dynamischen E-Modul von 90 MN/m², bzw. einem statischen E-Modul von 45 MN/m². Somit entspricht der E-Modul dem in der RStO 01 [43] geforderten statischen Mindest-Verformungsmodul E_{v2} auf dem Pla-

num. Liegt der berechnete UI-Wert unter diesem Grenzwert, gilt der Untergrund als nicht ausreichend tragfähig.

Zur Bewertung der Tragfähigkeit einer Straßenbefestigung erstellte JENDIA ein Diagramm aus der Kombination der Tragfähigkeitszahl T_z und dem UI-Wert. Durch das Eintragen der Grenzwerte teilt sich dieses sog. UI- T_z -Diagramm in vier Bereiche (siehe Abbildung 5.1), die zur Einsortierung, bzw. Bewertung der Tragfähigkeit einer Straßenbefestigung genutzt werden.

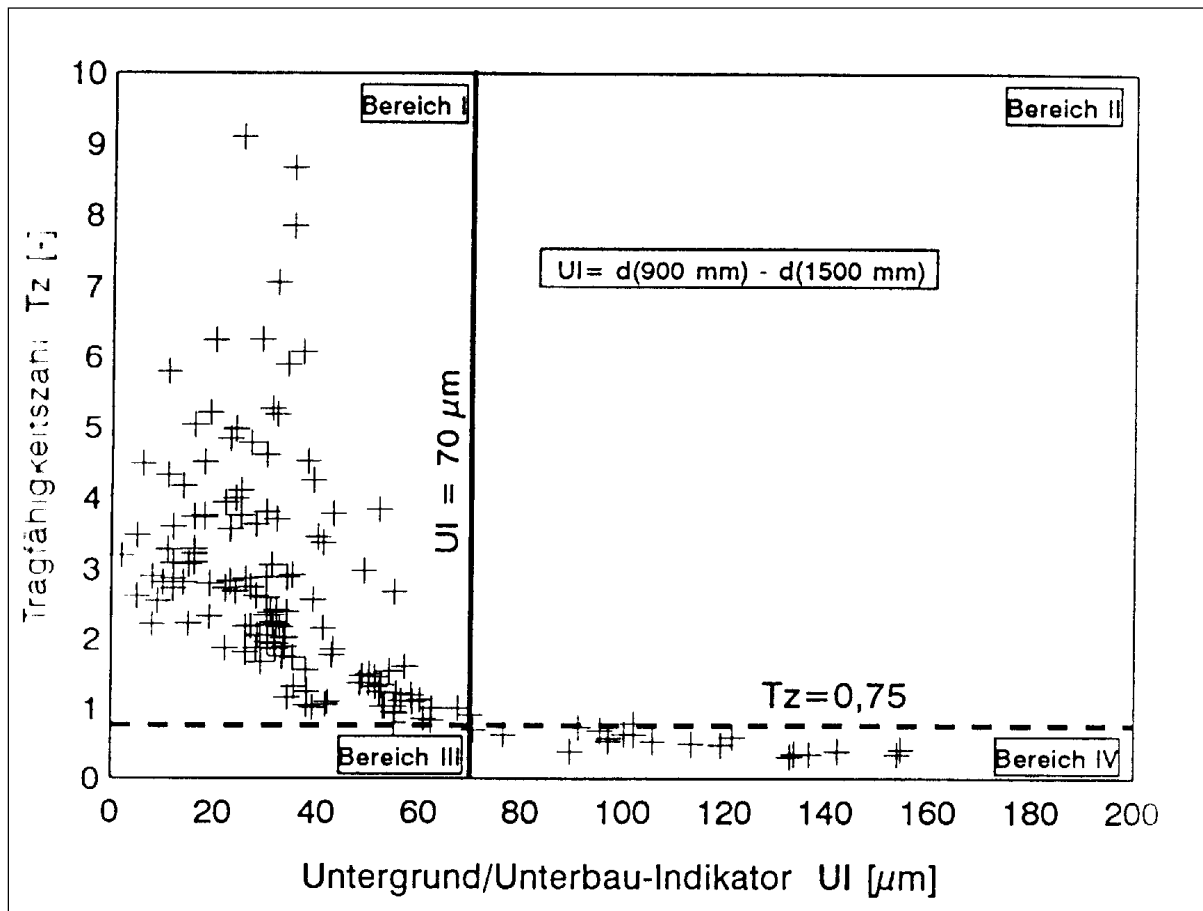


Abbildung 5.1: UI- T_z -Diagramm zur Beurteilung der Tragfähigkeit [32]

Jedem dieser Bereiche ist eine Bewertung der Tragfähigkeit der Straßenbefestigung zugeordnet, vgl. Tabelle 5.1.

Tabelle 5.1: Beurteilung der Tragfähigkeit einer Straßenbefestigung aufgrund des UI-Tz-Diagrammes nach JENDIA

Bereich I	Tz > 0,75 UI < 70 µm		
	-> Tragfähigkeit der gesamten Straßenbefestigung ist gewährleistet		
Bereich II	Tz > 0,75 UI > 70 µm		
	obere gebundene Schichten	+	-> Tragfähigkeit der gesamten Straßenbefestigung ist trotz hoher Tragfähigkeitszahl Tz nicht gewährleistet
	ungebundenen Schichten	+	
	Untergrund / Unterbau	-	
Bereich III	Tz < 0,75 UI < 70 µm		
	obere gebundene Schichten	-	-> Tragfähigkeit der gesamten Straßenbefestigung wird nur durch Erhaltungsmaßnahme wieder gewährleistet
	ungebundenen Schichten	o	
	Untergrund / Unterbau	+	
Bereich IV	Tz < 0,75 UI > 70 µm		
	-> Tragfähigkeit der gesamten Straßenbefestigung ist als mangelhaft zu beurteilen		
+	ausreichend Tragfähig		
o	keinen Einfluss		
-	geringe Tragfähigkeit		

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass JENDIA die Möglichkeit bietet, die Tragfähigkeit einer Straßenbefestigung in vier grobe Bereiche einzuteilen. Somit bietet JENDIA zwar einen qualitativen Bewertungshintergrund (Belastungsklassenunabhängig), aber keinen quantitativen Bewertungshintergrund, wie es in dieser Arbeit angestrebt wird.

5.2 Bewertungshintergrund Universität Karlsruhe

Im Forschungsprojekt „Erarbeitung eines Bewertungshintergrundes für Tragfähigkeitsmessungen auf der Basis von Zustandsindikatoren nach JENDIA“[42] wurde an der Universität Karlsruhe ein Hintergrund zur Bewertung der Tragfähigkeit einer Straßenbefestigung erarbeitet. Dieser Bewertungshintergrund baut auf der Arbeit von JENDIA (vgl. Abschnitt 5.1) auf.

Im Rahmen des Forschungsprojektes wurden auf 24 Versuchstrecken Messungen mit dem FWD durchgeführt. Die Messwerte und Informationen über die zu untersuchenden Strecken wurden in einer Datenbank gespeichert und statistisch ausgewertet. Auf Grundlage der statischen Auswertung wurde ein Bewertungshintergrund an-

hand von FWD-Referenzmaßzahlen für den Zustandsindikator D_0 und die Zustandsindikatoren nach JENDIA (vgl. Abschnitt 5.1) erstellt. Anhand der FWD-Referenzmaßzahlen können FWD-Messergebnisse von Strecken, die den Randbedingungen der Referenzmaßzahlen entsprechen, für eine grafische oder zahlenmäßige Bewertung genutzt werden.

Zur Anwendung der FWD –Referenzmaßzahlen müssen folgende Angaben über den zu bewertenden Streckenabschnitt vorliegen[42]:

- Bauweise und Bauklasse nach RStO 01 [43] oder Schichtenarten, -dicken und -folgen,
- Art der Tragschicht ohne Bindemittel einschließlich Art der Gesteinskörnung,
- Untergrundverhältnisse (z. B. E_{V2} -Wert)
- Messlinie
- Standard-Asphalttemperatur
- Datum der Verkehrsfreigabe zur Einstufung in die „Beharrungsphase“

Der Bewertungshintergrund ist aufgrund seines geringen Stichprobenumfangs nicht für eine quantitative Bewertung der Tragfähigkeit der Straßenbefestigung anwendbar. Zum gegenwärtigen Zeitpunkt wurde lediglich die prinzipielle Anwendbarkeit der FWD-Referenzzahlen aufgezeigt. Ob eine Erhöhung des Stichprobenumfangs die quantitative Bewertung anhand von FWD-Referenzzahlen ermöglicht, wurde bislang nicht geklärt. Um die Anwendbarkeit des Bewertungshintergrunds zu verbessern, wurde in [11] die Datenbasis durch Generierung theoretischer Deflexionsmulden vergrößert.

6 Erstellung Referenzsystem

Zur Erstellung des quantitativen Bewertungshintergrundes ist eine Einteilung der gemessenen Tragfähigkeit in ein festgelegtes Bewertungsschema erforderlich. Das Ziel dieser Arbeit ist die Erstellung eines Bewertungsschemas, welches die quantitative Bewertung der Tragfähigkeit (vgl. Abschnitt 2.3) anhand einer mit dem FWD (vgl. Abschnitt 3) gemessenen Deflexionsmulde ermöglicht. Zur Erstellung des quantitativen Bewertungshintergrundes wird nachfolgend ein Referenzsystem aufgestellt, welches die Einteilung in ein Bewertungsschema ermöglicht.

6.1 Randbedingungen

Bei der Aufstellung des Bewertungshintergrundes zur Bewertung der Tragfähigkeit von Asphaltstraßenbefestigungen müssen eine Reihe von Randbedingungen berücksichtigt werden. Die Randbedingungen haben einen Einfluss auf die gemessenen Deflexionen und somit auch auf die Tragfähigkeit der Asphaltstraßenbefestigung. Nachfolgend sind die zu berücksichtigenden Randbedingungen aufgeführt:

- Schichtdicken / Schichtenfolge / Schichtarten (Belastungsklasse/Bauweisenvarianten)
- E-Modul der Schichten (Asphalt, ToB, Untergrund)
- Asphaltkörpertemperatur
- Belastung und Belastungsfrequenz

Insbesondere der Einfluss des Untergrund E-Moduls muss berücksichtigt werden. Der Untergrund E-Modul hat einen großen Einfluss auf die Tragfähigkeit der gesamten Asphaltstraßenbefestigung.

6.1.1 Schichtenaufbau (Belastungsklassen)

Zur Vereinfachung der quantitativen Bewertung werden die Asphaltschichten für die nachfolgenden Betrachtungen und bei der Erstellung des Referenzsystems zu einer Schicht zusammengefasst. Für die nachfolgenden Betrachtungen und Berechnungen ist es unerheblich, ob jede Asphaltschicht einzeln oder die Asphaltschichten zu einer Schicht zusammengefasst werden. Durch die Veränderung des E-Moduls und der Schichtdicken der zusammengefassten Asphaltschichten können die gleichen Deflexionen erzeugt werden wie durch eine Veränderung des E-Moduls und der Schichtdicken der einzelnen Asphaltschichten. Durch die Zusammenfassung der Asphalt-

schichten ergibt sich ein Dreischichtsystem, welches aus dem Untergrund, der Tragschichten ohne Bindemittel (ToB) und der Asphaltschicht besteht.

Nachfolgend wird der Einfluss unterschiedlicher Asphalt- und ToB-Schichtdicken auf die Deflexionen beschrieben. Als Grundlage dienen die Schichtdicken der RStO 12 [44] Zeile 1 (Belastungsklassen Bk100 – Bk1,8), welche zur Erstellung der Tragfähigkeitsklassen des Referenzsystems in Abschnitt 6.2 genutzt werden.

Zur Darstellung des Einflusses unterschiedlicher Asphaltschichtdicken wurde Deflexionsmulden mit BISAR berechnet. Bei den Berechnungen der Deflexionsmulden wurde die Asphaltschichtdicke (340 mm, 300 mm, 260 mm, 220 mm, 180 mm) variiert. Die Berechnungen wurden jeweils für eine ToB-Schichtdicke von 250 mm (kleinste mögliche ToB-Schichtdicke der betrachtenden RStO 12 [44] Belastungsklassen), 590 mm (größte mögliche ToB-Schichtdicke der betrachtenden RStO 12 [44] Belastungsklassen) und ohne ToB durchgeführt. Die E-Moduln der einzelnen Schichten wurden für alle Berechnungen konstant gewählt. In Diagramm 6.1 sind die berechneten Deflexionsmulden mit einer ToB-Schichtdicke von 250 mm in Blau, von 590 mm in Rot und von 0 mm in Grün dargestellt.

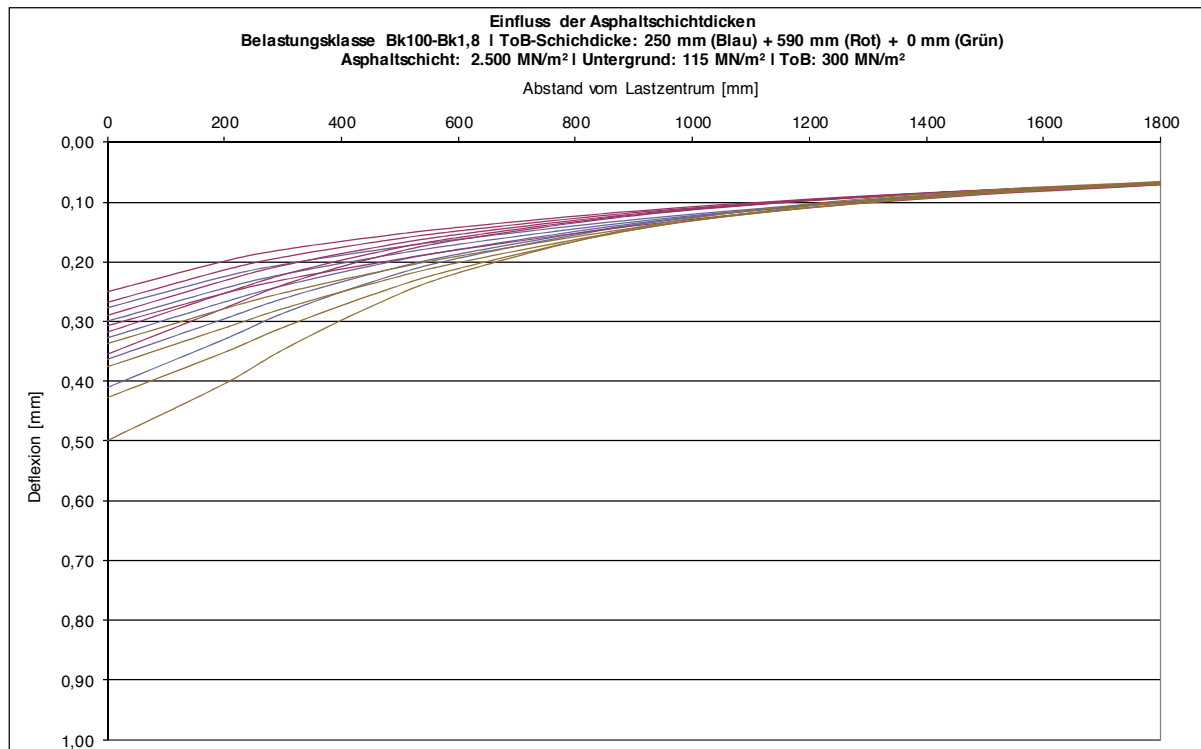


Diagramm 6.1: Einfluss der Asphaltschichtdicken

Nachfolgend wird der Einfluss der ToB-Schichtdicke dargestellt. Dazu wurden mit BISAR Deflexionsmulden mit unterschiedlichen ToB-Schichtdicken berechnet. In Di-

agramm 6.2 sind die Deflexionsmulden für die drei möglichen ToB-Schichtdicken, der größten möglichen Asphalttschichtdicke für die Belastungsklassen Bk100 nach RStO 12 [44] Zeile 1 in Rot dargestellt. In Diagramm 6.3 sind die Deflexionsmulden für die vier möglichen ToB-Schichtdicken, der kleinsten möglichen Asphalttschichtdicke für die Belastungsklassen Bk1,8 nach RStO 12 [44] Zeile 1, in Rot dargestellt. Zusätzlich sind in beiden Diagrammen (blaue Linie) noch die berechneten Deflexionsmulden ohne ToB-Schicht dargestellt. Die E-Moduln der einzelnen Schichten wurden für alle Berechnungen konstant gewählt.

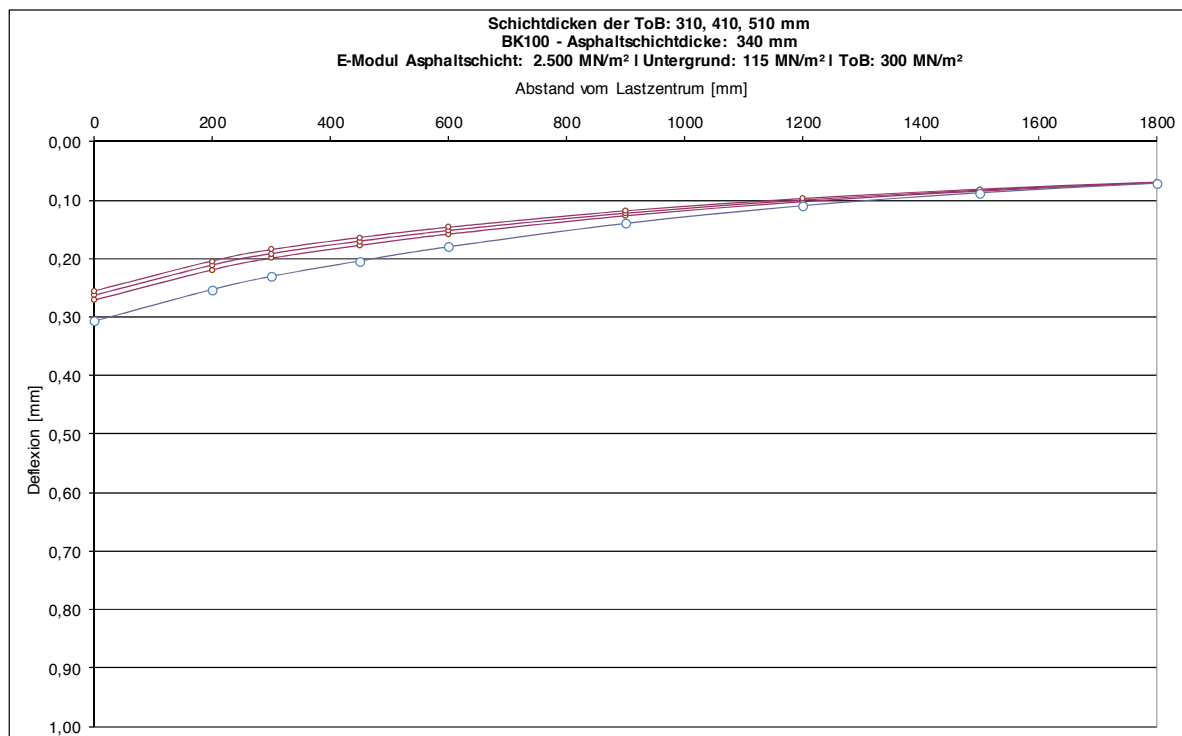


Diagramm 6.2: Einfluss der ToB-Schichtdicke (Belastungsklasse Bk100)

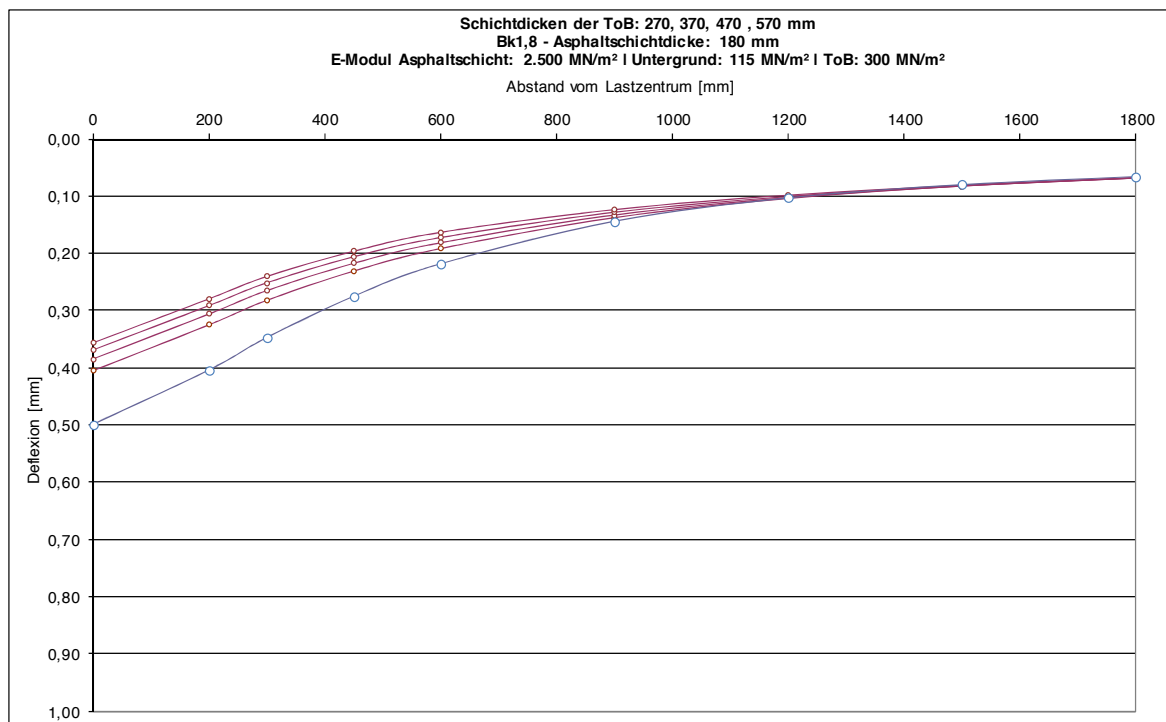


Diagramm 6.3: Einfluss der ToB-Schichtdicke (Belastungsklasse Bk1,8)

In Diagramm 6.4 sind die berechneten Deflexionsmulden für alle Asphalt- und ToB-Schichtdicken der RStO 12 [44] Zeile 1 der betrachtenden Belastungsklassen (Bk100 – Bk1,8) dargestellt.

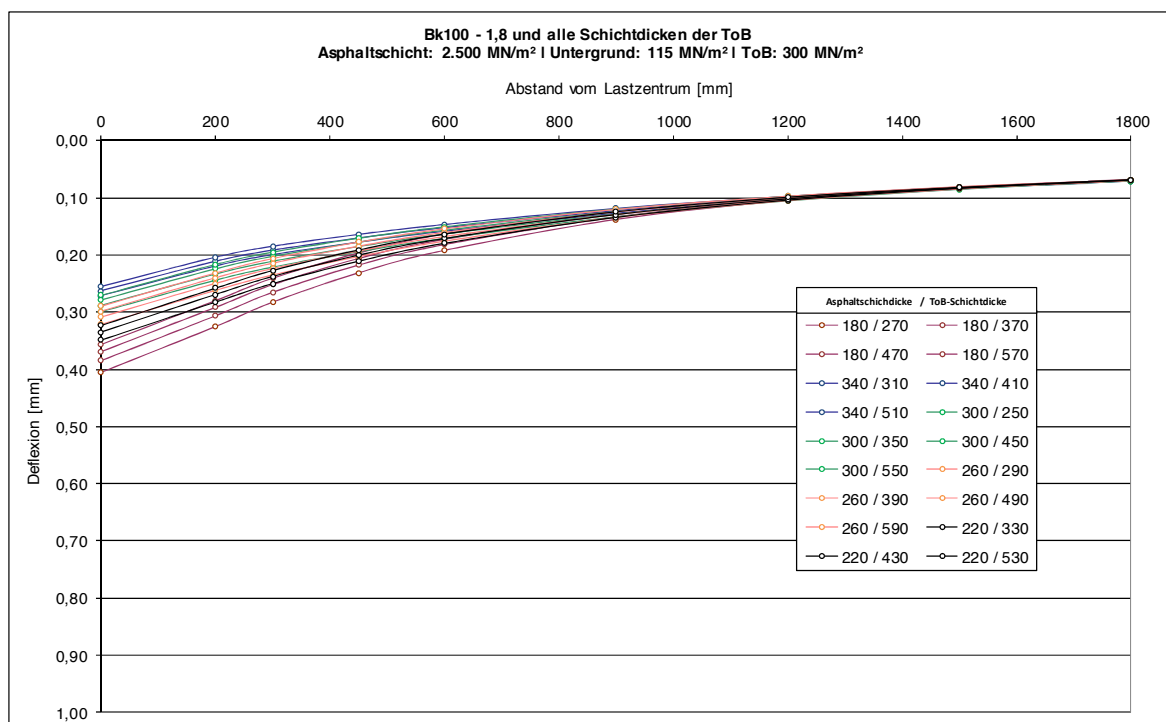


Diagramm 6.4: Einfluss der Asphalt- und ToB-Schichtdicke (Belastungsklasse Bk100 – Bk1,8)

Aus Diagramm 6.1 bis Diagramm 6.4 wird ersichtlich, dass die Variation der Asphalt- und ToB-Schichtdicken ausschließlich einen Einfluss auf den vorderen Bereich (Geo-

fonabstände: 0 – 1500mm) der Deflexionsmulde hat. Im hinteren Bereich (Geofonabstände: 1500 – 1800mm) laufen alle Deflexionsmulden zusammen. Die Reduzierung der Schichtdicken führt zu einer Zunahme der Deflexionen. Die Zunahme der Deflexionen erhöht sich mit kleiner werdendem Abstand zum Lastzentrum und wird nachfolgend als Abfallen der Deflexionsmulde bezeichnet. Insgesamt ist der Einfluss der ToB-Schichtdicke im Vergleich zur Asphaltsschichtdicke auf die Deflexionen geringer. Der Einfluss der ToB-Schichtdicke wird mit zunehmender Asphaltsschichtdicke kleiner.

In Diagramm 6.4 ist zu erkennen, dass eine Differenzierung des Asphalt- und ToB-Schichtdickeneinflusses auf die Deflexionsmulde nur schwer möglich ist, da beide die Deflexionsmulde im vorderen Bereich beeinflussen.

6.1.2 E-Modul der Schichten

Die Deflexionsmulden werden durch den E-Modul der einzelnen Schichten beeinflusst. Der E-Modul der Asphaltsschichten, der ToB und des Untergrundes wirken sich unterschiedlich aus.

Zur Darstellung des Asphaltsschicht-E-Moduln Einflusses wurden für unterschiedliche Asphaltsschicht-E-Moduln die Deflexionsmulden mit BISAR berechnet. Die Berechnungen der Deflexionsmulden wurden für zwei unterschiedliche Schichtdicken (Belastungsklasse: Bk100, Bk1,8), mit der jeweils größten ToB-Schichtdicke, durchgeführt. Der Asphaltsschicht-E-Modul wurde zwischen 1.000 und 25.000 MN/m² variiert. Die E-Moduln der restlichen Schichten wurden für alle Berechnungen konstant gewählt. In Diagramm 6.5 sind die berechneten Deflexionsmulden für die Belastungsklasse Bk100 in Blau und für die Belastungsklasse Bk1,8 in Rot dargestellt.

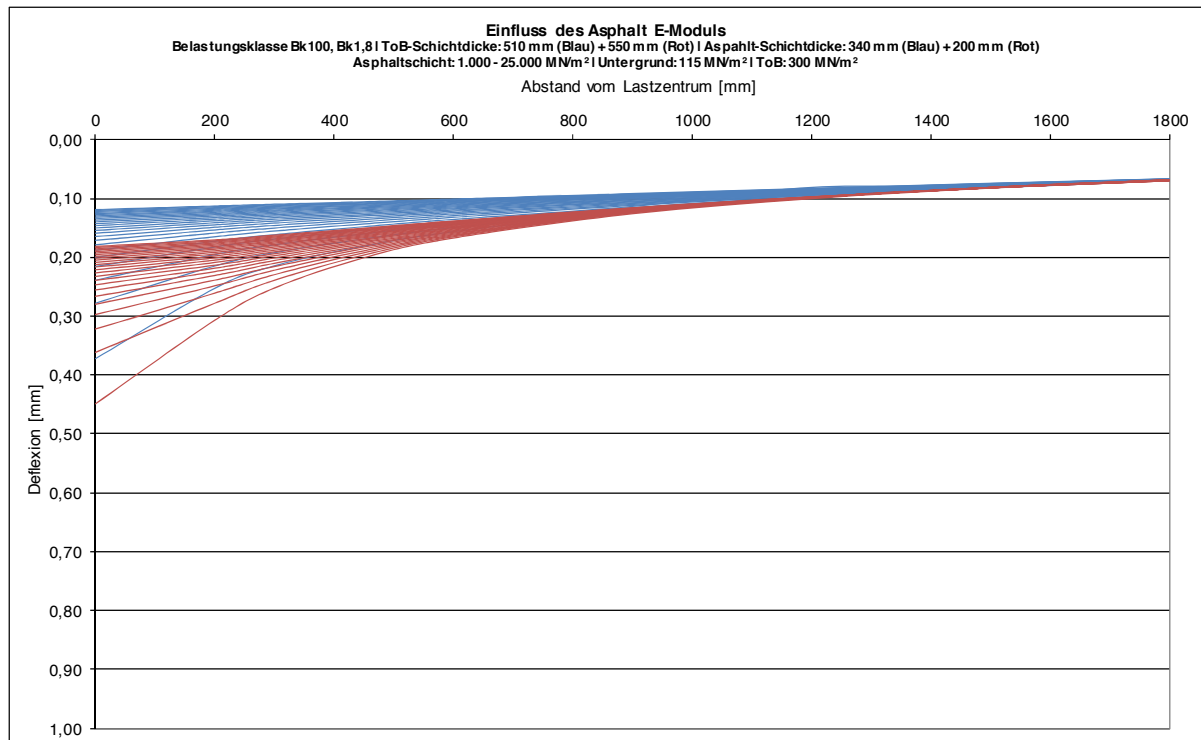


Diagramm 6.5: Einfluss des Asphalt-schichten E-Moduls auf die Deflexionsmulde

Aus Diagramm 6.5 wird ersichtlich, dass der Asphalt-schicht-E-Modul ausschließlich einen Einfluss auf den vorderen Bereich (Geofonabstände: 0 – 1500mm) der Deflexionsmulde hat. Im hinteren Bereich (Geofonabstände: 1500 – 1800mm) laufen alle Deflexionsmulden zusammen. Dieses Verhalten entspricht dem zuvor beschriebenen Verhalten bei der Veränderung der Asphalt-schichtdicke. Zur Verdeutlichung des identischen Verhaltens sind in Diagramm 6.6 Deflexionsmulden mit unterschiedlichen Asphalt-schichtdicken und Asphalt-schicht-E-Moduln dargestellt.

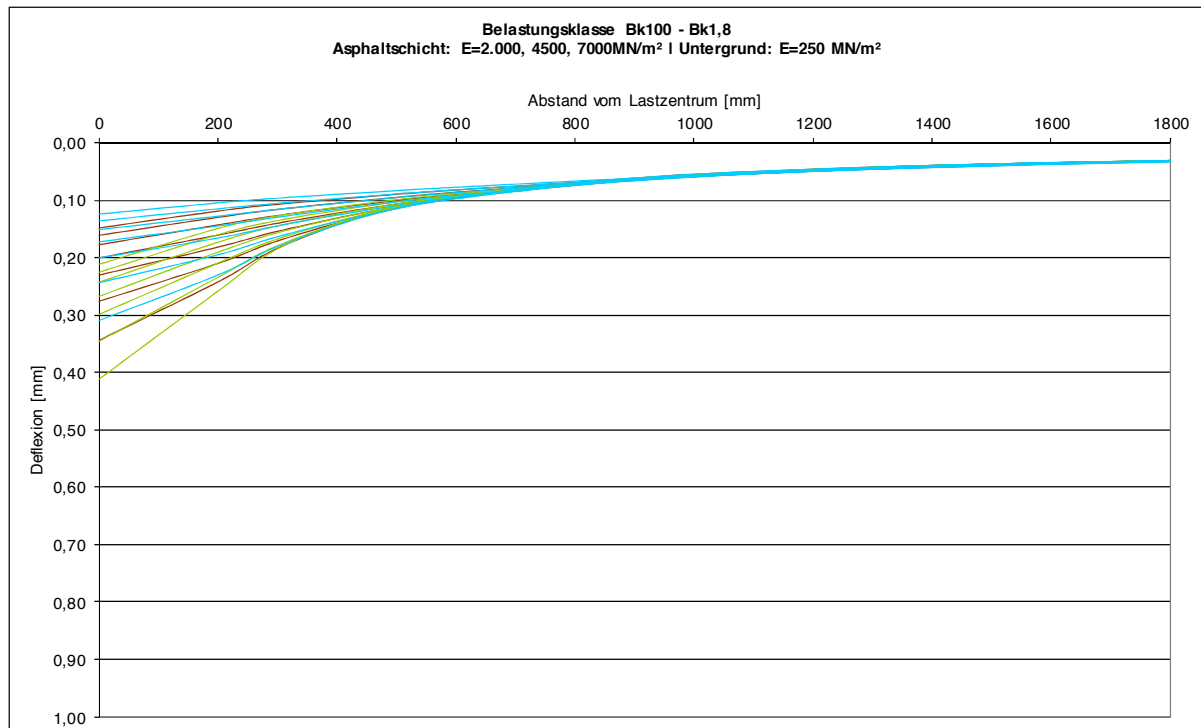


Diagramm 6.6: Einfluss der Schichtdicken und des Asphalttschicht E-Moduls auf die Deflexionsmulde

Der Einfluss des Asphalttschicht-E-Moduls auf den vorderen Bereich der Deflexionsmulde muss bei der quantitativen Bewertung berücksichtigt werden.

In Diagramm 6.7 ist der Einfluss des ToB-E-Moduls anhand von mit BISAR berechneten Deflexionsmulden dargestellt. Dazu wurde der E-Modul der ToB zwischen 200 MN/m^2 und 1.000 MN/m^2 variiert. Der E-Modul der Asphalttschichten und des Untergrundes ist dagegen bei allen dargestellten Deflexionsmulden gleich. Die Berechnungen der Deflexionsmulden wurden für zwei unterschiedliche Asphalttschichtdicken (Belastungsklasse Bk100 und Bk1,8) mit der jeweils größten ToB-Schichtdicke durchgeführt.

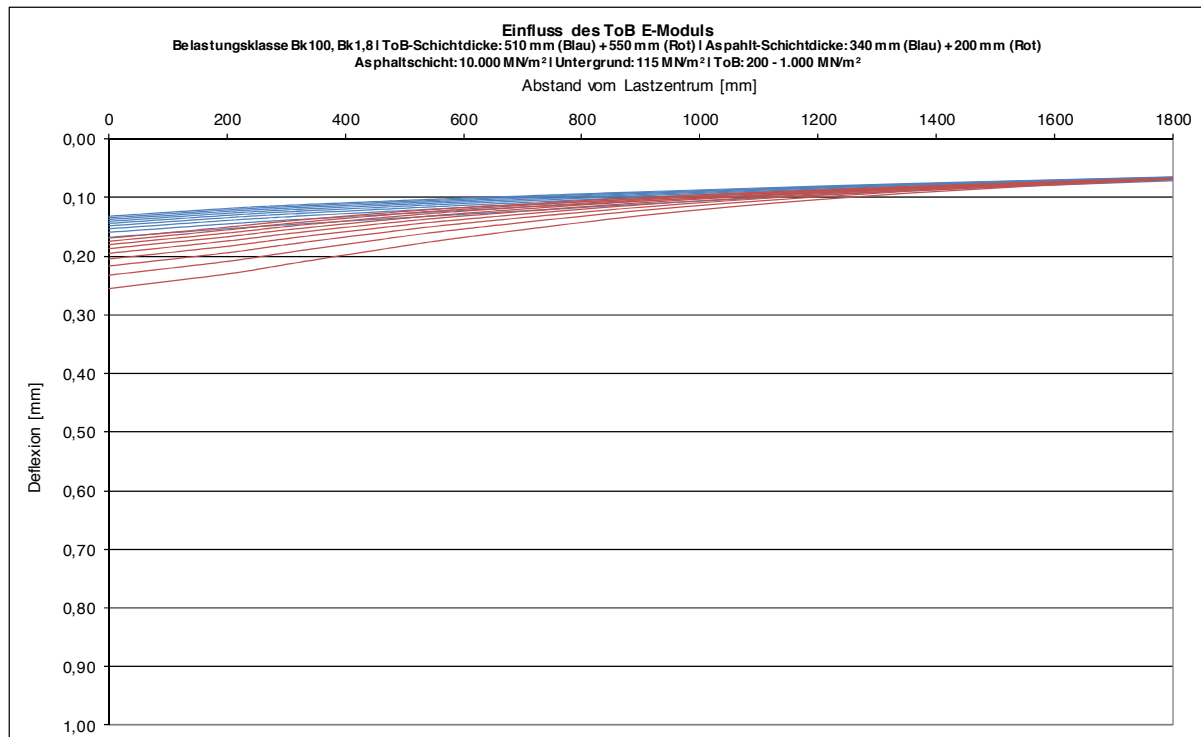


Diagramm 6.7: Einfluss des ToB-E-Moduls auf die Deflexionsmulde

Diagramm 6.7 zeigt, dass der Einfluss des ToB-E-Moduls aufgrund seines niedrigen E-Moduls und der geringen Schichtdicke einen geringen Einfluss auf den Verlauf der Deflexionsmulde hat. Der ToB-E-Modul beeinflusst den Verlauf im vorderen Bereich der Deflexionsmulde und kann nicht vom Einfluss des Asphaltschicht-E-Moduls unterschieden werden. Der Einfluss des Asphaltschicht-E-Moduls auf die Deflexionsmulde ist größer als die der Asphaltschichtdicke.

Der Einfluss unterschiedlicher Untergrund-E-Moduln auf die Deflexionsmulden ist in Diagramm 6.8 anhand von mit BISAR berechneten Deflexionsmulden dargestellt. Um den Einfluss des Untergrund-E-Modul auf die Deflexionsmulden deutlich zu machen, wurde der Untergrund-E-Modul zwischen 10 MN/m² und 250 MN/m² variiert. Der E-Modul der Asphaltschicht und der ToB ist für alle dargestellten Deflexionsmulden konstant.

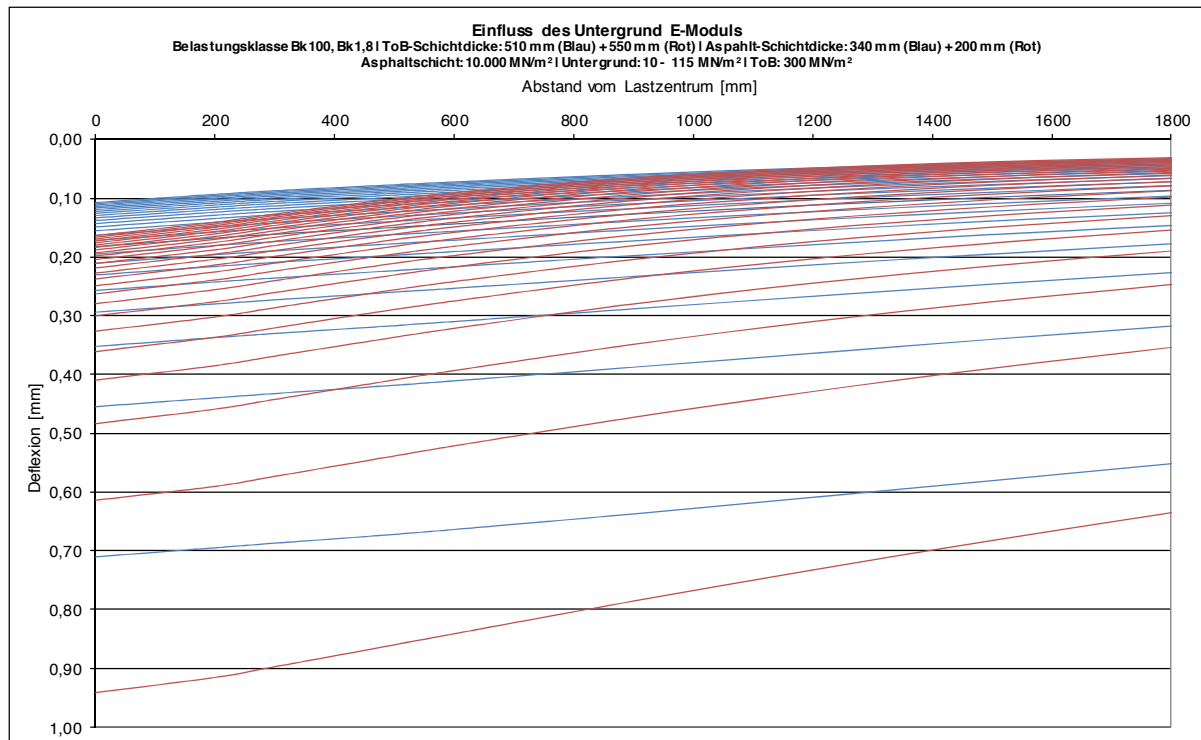


Diagramm 6.8: Einfluss des Untergrund E-Moduls auf die Deflexionsmulde

Der Untergrund hat im Vergleich zur Asphalt-Schicht einen geringeren E-Modul. Aufgrund seiner unendlichen Schichtdicke wirkt er sich deutlich auf den Verlauf der Deflexionsmulde aus. Anhand von Diagramm 6.8 wird deutlich, dass sich der Untergrund-E-Modul auf den gesamten Verlauf der Deflexionsmulde auswirkt. Die quantitative Bewertung ist somit nur unter Berücksichtigung des Untergrund-E-Moduls möglich, vgl. Abschnitt 7.

6.1.3 Temperatureinfluss

Wie im Diagramm 6.9 zu erkennen ist, hat die Temperatur einen großen Einfluss auf den Asphalt-E-Modul und somit auf die gemessenen Deflexionen. Daher muss bei der quantitativen Bewertung der Tragfähigkeit der Einfluss der Temperatur berücksichtigt werden. Der Einfluss der Temperatur auf die gemessenen Deflexionen wird durch eine Temperaturkorrektur berücksichtigt. Die Temperaturkorrektur der gemessenen Deflexionen wird nach JANSEN [31] durchgeführt. Die Temperaturkorrektur erfolgt auf eine Standardtemperatur von 20°C.

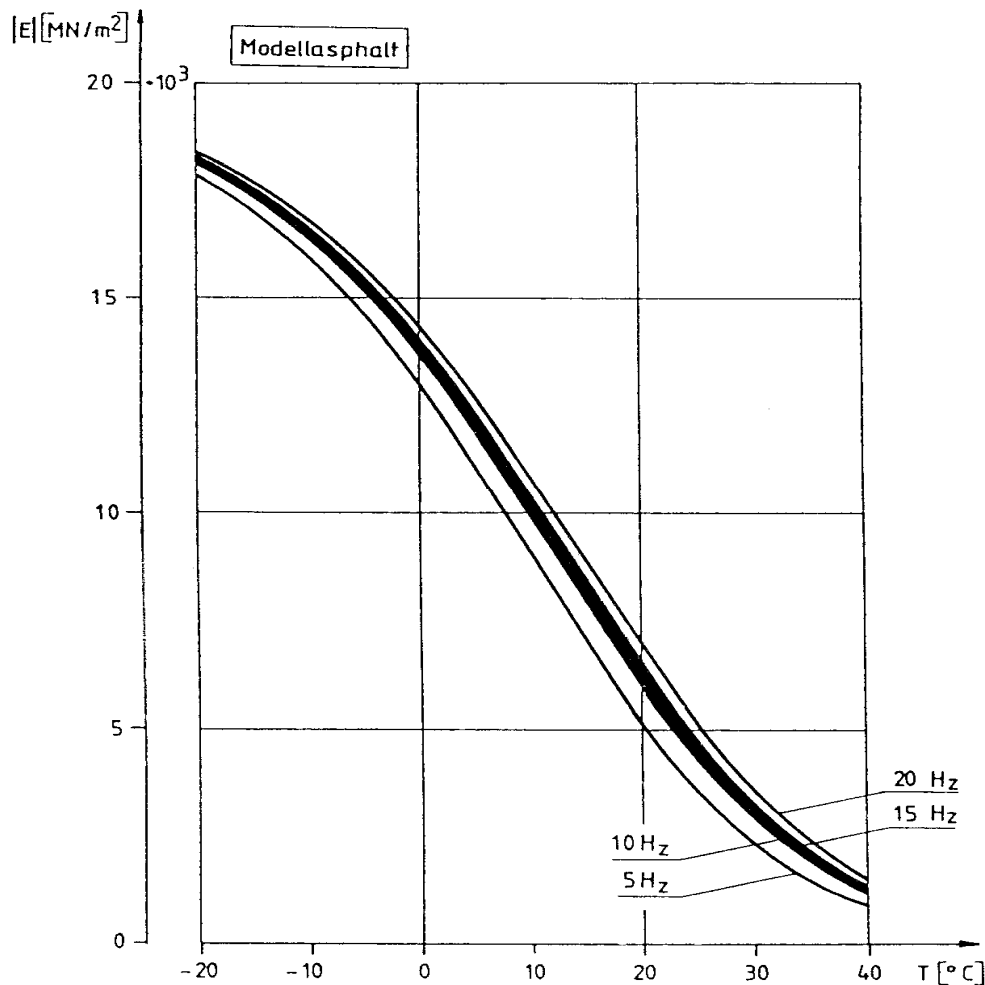


Diagramm 6.9: Absoluter Modul $|E|$ von Asphalt in Abhängigkeit von der Temperatur bei verschiedenen Frequenzen [8]

6.1.4 Belastung und Belastungsfrequenzen

Die durch das FWD erzeugte Belastung beträgt bei der Messung auf Asphaltstraßen in der Regel 50 kN. Da in der Praxis ein exakter Laststoß von 50 kN nur selten erreicht wird, können mögliche Abweichungen durch eine lineare Lastkorrektur ausgeglichen werden. Für die nachfolgenden Betrachtungen und die Erstellung des Referenzmodells kann somit eine Belastung von 50 kN, bzw. mit einer Flächenpressung von $0,707 \text{ kN/m}^2$ angenommen werden.

Wie dem Diagramm 6.9 zu entnehmen ist, hat die Belastungsfrequenz einen vergleichsweise geringen Einfluss auf den E-Modul des Asphaltes und somit auch auf die gemessenen Deflexionen. Die Belastungsfrequenz wird daher bei der quantitativen Bewertung vernachlässigt.

6.2 Erstellung des Referenzsystems

Für die quantitative Bewertung der Tragfähigkeit von Asphaltstraßenbefestigungen werden nachfolgend das Bewertungsschema und der Aufbau des Referenzsystems beschrieben.

6.2.1 Tragfähigkeitsklassen

Das Ziel dieser Arbeit ist die Erstellung eines quantitativen Bewertungshintergrundes, welcher eine Einordnung der Tragfähigkeit einer Asphaltstraßenbefestigung in ein vorgegebenes Bewertungsschema ermöglicht. Anhand dieses Bewertungsschemas soll eine Aussage darüber getroffen werden, ob eine Asphaltstraßenbefestigung hinsichtlich der vorhandenen Verkehrsbelastung ausreichend tragfähig ist oder nicht. Dazu ist es vorteilhaft, ein Bewertungsschema in Anlehnung an die Belastungsklassen der RStO 12 [44] zu erstellen. Das an die RStO 12 [44] angelehnte Bewertungsschema ermöglicht Rückschlüsse auf die vorhandene IST-Belastungsklasse und einen Vergleich mit der erforderlichen Soll-Belastungsklasse.

Bei dem hier aufgestellten quantitativen Bewertungshintergrund werden nur die Belastungsklasse Bk100 bis Bk1,8 betrachtet. Die Belastungsklasse Bk1,0 und Bk0,3 werden nicht betrachtet. Für die quantitative Bewertung dieser Belastungsklassen, welche in der Regel nur im innerstädtischen Bereich (Anliegerstraßen) vorzufinden sind, ist ein eigener Bewertungshintergrund erforderlich, da hier spezielle Randbedingungen (z.B. Rohrleitungen) berücksichtigt werden sollten. Der Bewertungshintergrund sollte das gesamte innerstädtische Netz berücksichtigen und eine Maßnahmenreihung empfehlen.

Als Bewertungsschema wurden die in Tabelle 6.1 dargestellten sechs Tragfähigkeitsklassen definiert.

Tabelle 6.1: Tragfähigkeitsklassen

Tragfähigkeitsklasse	Entspricht der Belastungsklasse nach RStO 12 [44]	Verkehrsbeanspruchung (Äquivalenter 10t-Achsübergang in Mio.)
A	Bk100	> 32
B	Bk32	10 - 32
C	Bk10	3,2 – 10
D	Bk3,2	1,8 – 3,2
E	Bk1,8	1,0 – 1,8
F	< Bk1,8	< 1,0

Die Tragfähigkeitsklassen A - E entsprechen jeweils einer Belastungsklasse und somit einen Verkehrsbeanspruchungsbereich. Die Tragfähigkeitsklasse F entspricht einer Belastungsklasse bzw. Verkehrsbeanspruchung die schlechter als Belastungsklasse Bk1,8 ist.

6.2.2 Aufbau des Referenzsystems

Für die weiteren Betrachtungen wird eine weitere Vereinfachung, welche das betrachtete 3-Schichtsystem auf ein 2-Schichtsystem reduziert, vorgenommen. Nachfolgend werden drei mögliche Varianten zur Reduzierung auf ein 2-Schichtsystem vorgestellt.

Variante 1:

Die Vereinfachung auf ein 2-Schichtsystem kann durch die Zusammenfassung der ungebundenen Schichten (Untergrund und ToB) erfolgen. Die Zusammenfassung der ungebundenen Schichten zur Bestimmung der Tragfähigkeit wurde auch von GRÄTZ [19] in seiner Habilitation beschrieben. Für die in Abschnitt 7 beschriebene Untergrundkorrektur ist die Bestimmung des Untergrund-E-Moduls erforderlich. Die Untergrundkorrektur wäre durch eine Zusammenfassung der ungebundenen Schichten nicht mehr möglich. Die Vereinfachung auf ein Zweischichtsystem durch das Zusammenfassen der ungebundenen Schichten ist somit nicht möglich.

Variante 2:

Durch das Entfernen der ToB kann ein 2-Schichtsystem bestehend aus Untergrund und Oberbau erstellt werden. Das Entfernen der ToB würde zu einem deutlich veränderten Verlauf der Deflexionsmulde führen, vgl. Diagramm 6.2 und Diagramm 6.3. Die quantitative Bewertung der Tragfähigkeit wäre nicht mehr ausreichend genau. Die Reduzierung auf ein 2-Schichtsystem durch Entfernung der ToB ist somit nicht möglich.

Variante 3:

Durch Zusammenfassen der Asphaltsschichten und der ToB kann ein 2-Schichtsystems, bestehend aus Oberbau und Untergrund, erstellt werden. Die Zusammenfassung ist durch den identischen Einfluss der Asphaltsschichten und der ToB auf den vorderen Bereich der Deflexionsmulde möglich, vgl. Abschnitt 6.1. Für die quantitative Bewertung der Tragfähigkeit ist es unerheblich, ob sich der Verlauf der Deflexionsmulde im vorderen Bereich aufgrund der Asphaltsschicht, der ToB oder

aufgrund des gesamten Oberbaus verändert. Der Oberbau des Zweischichtsystems beeinflusst, identisch zur Asphalt-schicht und ToB, ausschließlich den vorderen Bereich der Deflexionsmulde und der Untergrund den Verlauf der gesamten Deflexionsmulde. Das Ziel dieser Arbeit ist die quantitative Bewertung der Tragfähigkeit des gesamten Oberbaus und nicht die einzelner Schichten. Die quantitative Bewertung der Tragfähigkeit des gesamten Oberbaus ist durch die Zusammenfassung Asphalt-schichten und der ToB weiterhin möglich. Für die nachfolgenden Betrachtungen wird daher ein Zweischichtsystem, bestehend aus Oberbau (Asphalt-schicht + ToB) und Untergrund, gewählt.

Die Aufstellung des 2-Schichtsystems nach Variante 3 wird nachfolgend beschrieben. Da die Bewertung der Tragfähigkeit anhand von Tragfähigkeitsklassen einer Zuordnung zur Belastungsklasse entspricht, werden bei der Erstellung des Referenzsystems die Schichtdicken der einzelnen Belastungsklassen nach Tafel 1, Zeile 1.1 der RStO 12 [44] betrachtet.

Für das Zusammenfassen der Asphalt-schicht und der ToB muss die Dicke der ToB für jede Belastungsklasse festgelegt werden. Durch die Aufstellung des Referenzsystems mit der kleinsten möglichen ToB-Schichtdicke würde sich der Einfluss der ToB auf die Deflexionsmulde verkleinern. Die anhand des Referenzsystems berechneten Deflexionen würden zunehmen und das hergeleitete Bewertungsschema eine gemessene Deflexionsmulde möglicherweise zu gut bewerten. Um bei der quantitativen Bewertung der Tragfähigkeit eine zu gute Bewertung der Tragfähigkeit zu vermeiden, wird die ToB-Schichtdicke möglichst groß gewählt, um eine gemessene Deflexionsmulde eher mit einer zu geringen Tragfähigkeit zu bewerten. Es wird daher die größte ToB-Schichtdicke für jede Belastungsklasse gewählt.

Die Oberbaudicke für das 2-Schichtsystem wurde mit Hilfe von Mehrschichtenrechnungen am 3-Schichtsystem kalibriert. Die berechneten Einsenkungen im Lastzentrum für das 2-Schichtsystem wurden durch Anpassung der Oberbaudicke an die des 3-Schichtsystem angenähert. Die Oberbaudicke des 2-Schichtsystems wurde für jede der fünf Tragfähigkeitsklassen berechnet. Der E-Modul der ToB für das 3-Schichtsystem wurde mit 300 MN/m^2 , entsprechend den Erfahrungen des Institutes für Straßenbau und Verkehrswesen der Universität Duisburg-Essen gewählt. Der E-Modul des Asphaltes für das 3-Schichtsystem und der E-Modul des Oberbaus (Oberbaumodul E_A) für das 2-Schichtsystem wurde mit 7.000 MN/m^2 , entsprechend

dem Modellasphalt für eine Asphalttemperatur von 20°C nach [8], gewählt. Für jede Tragfähigkeitsklasse sind in Tabelle 6.2 die Schichtdicken, E-Moduln, berechnete Einsenkungen im Lastzentrum für das 3-Schichtsystem und die berechneten Oberbaudicken und Einsenkungen im Lastzentrum für das 2-Schichtsystem dargestellt. Zusätzlich sind die Abweichungen zwischen den berechneten Einsenkungen, des 2- und 3-Schichtsystem, dargestellt.

Tabelle 6.2: Berechnung der Oberbauschichtdicke für das 2-Schichtsystem

T K	3-Schichtsystem					2-Schichtsystem		Abweichung (2- und 3- Schichtsys- tem) [mm]
	Schichtdicken [cm]		E-Modul [MN/m ²]		Einsen- kung Last- zentrum [mm]	<i>Schichtdi- cke Ober- bau [cm]</i>	Einsen- kung Last- zentrum [mm]	
	ToB	Asphalt	ToB	Asphalt				
A	51	34	300	7000	0,1786	40	0,1785	0,0001
B	55	30			0,1931	36	0,1951	0,0020
C	59	26			0,2110	32	0,2157	0,0047
D	51	22			0,2425	28	0,2421	0,0004
E	55	20			0,2555	26	0,2583	0,0028

Die für die Tragfähigkeitsklassen A - E und die festgelegten Randbedingungen erstellten Schichtdicken der Zweischichtsysteme (Referenzsysteme) sind in Abbildung 6.1 dargestellt. Für die Tragfähigkeitsklasse F sind keine Schichtdicken dargestellt, da alle gemessenen Deflexionsmulden, die nicht mindestens der Tragfähigkeitsklasse E entsprechen, automatisch der Tragfähigkeitsklasse F zugeordnet werden.

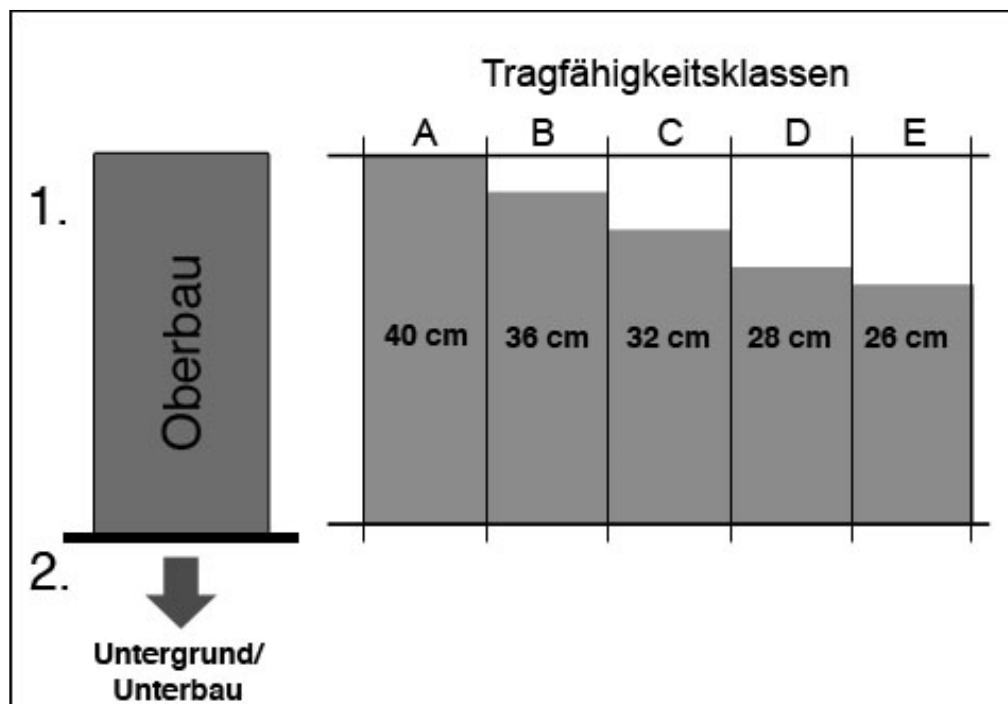


Abbildung 6.1: Referenzsystem (Schichtdicken des Zweischichtsystems)

7 Lösungsansatz zur Untergrundkorrektur

Der Untergrund E-Modul wirkt sich, wie in Abschnitt 6.1.2 beschrieben, auf die gesamte Deflexionsmulde aus. Eine quantitative Bewertung der Tragfähigkeit ist somit nur möglich, wenn der Einfluss des Untergrund-E-Moduls berücksichtigt wird. Die Berücksichtigung des Untergrund-E-Moduls wird anhand einer Korrektur des Untergrund-E-Moduls auf einen festgelegten „Standard“ Untergrund-E-Modul durchgeführt.

7.1 Standard Bettungsmodul

Die Korrektur zur Berücksichtigung unterschiedlicher Untergrund-E-Moduln (Untergrundkorrektur), erfolgt auf einen festgelegten Untergrund- E-Modul. Der festgelegte Untergrund-E-Modul wird im Rahmen dieser Arbeit als Standard-Bettungsmodul bezeichnet. Als Standard-Bettungsmodul wird ein dynamischer E-Modul von 115 MN/m^2 gewählt. Gemäß den ZTV E-StB 09 [53] muss zum Nachweis einer ausreichenden Tragfähigkeit auf dem Planum bei frostempfindlichen Böden (Frostempfindlichkeitsklasse F2 und F3) das 10%-Mindestquantil des statischen Verformungsmoduls E_{V2} von 45 MN/m^2 nachgewiesen werden. Da das FWD-Messverfahren ein dynamisches Verfahren ist, bedeutet dies, dass der durch die Deflexion D_{1800} zurückgerechnete Untergrund E-Modul ein dynamischer ist und nach [7] das 2- bis 2,5-fachen des statischen E-Moduls beträgt. Der dynamische Untergrund-E-Modul wird im Rahmen dieser Arbeit zur Sicherheit aus dem 2,5-fachen des statischen E-Moduls berechnet. Für eine quantitative Beurteilung der Untergrundtragfähigkeit bedeutet dies, dass eine ausreichende Tragfähigkeit dann vorhanden ist, wenn der zurückgerechnete Untergrund-E-Modul mindestens 115 MN/m^2 beträgt.

7.2 Bestimmung des Untergrund-E-Modul

Wie bereits in Abschnitt 6.1.2 beschrieben, hat der Untergrund einen großen Einfluss auf die gesamte Deflexionsmulde. Der Einfluss des Oberbaumodul E_A auf den vorderen Bereich und der Einfluss des Untergrund- E-Modul auf den gesamten Bereich der Deflexion sind in Diagramm 7.1 und Diagramm 7.2 dargestellt.

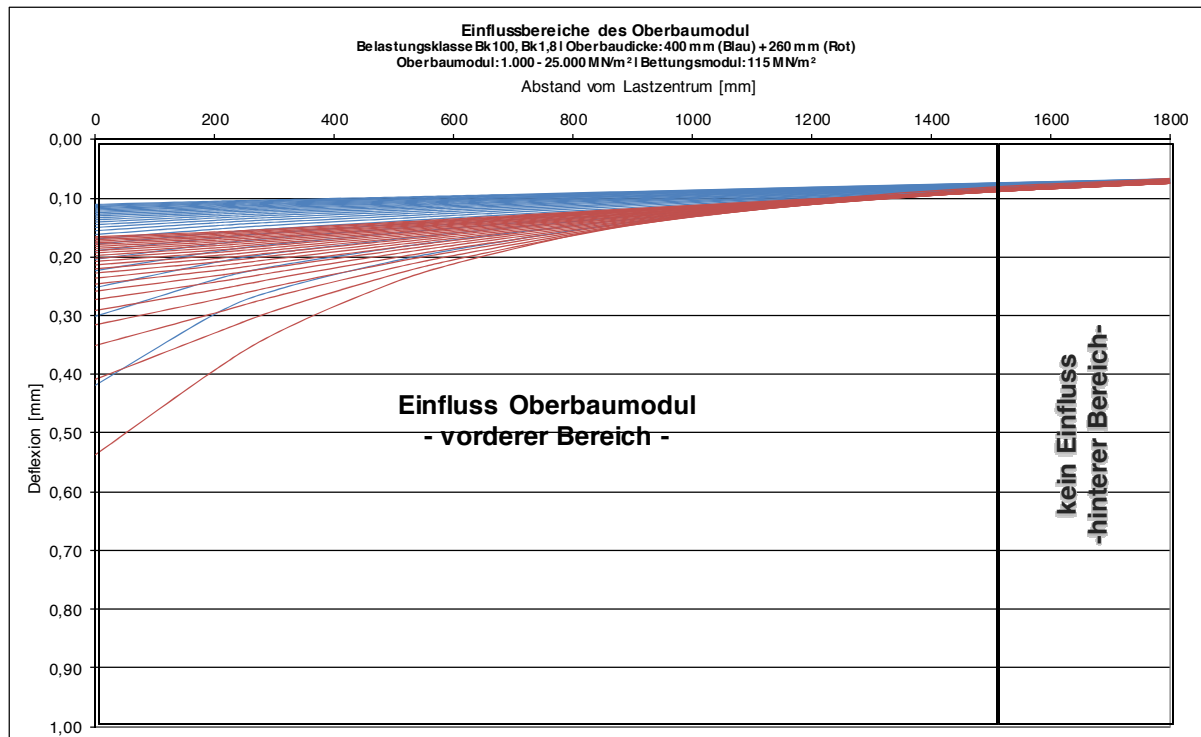


Diagramm 7.1: Einfluss des Oberbaumoduls E_A auf die Deflexionsmulde

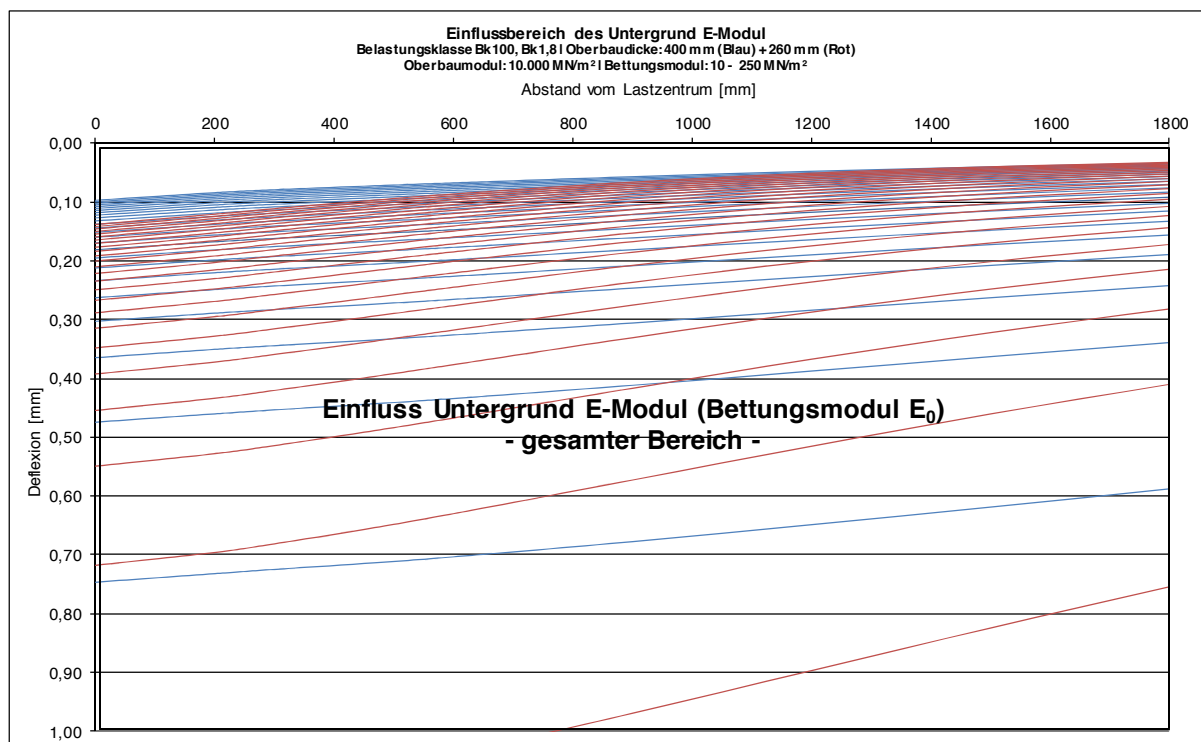


Diagramm 7.2: Einfluss des Untergrund-E-Modul (Bettungsmodul E_0) auf die Deflexionsmulde

Anhand der Diagramm 7.1 und Diagramm 7.2 wird deutlich, dass der hintere Bereich der Deflexionsmulde ausschließlich durch den Untergrund-E-Modul beeinflusst wird. Die Deflexionen im hinteren Bereich der Deflexionsmulde (Abstand zum Lastzentrum: ≥ 1500 cm) ermöglichen die Bestimmung des Untergrund-E-Moduls.

Der Untergrund-E-Modul wird für die nachfolgenden Betrachtungen aus den Deflexionen D_{1800} ermittelt. Die Verwendbarkeit der Deflexionen D_{1800} zur Bestimmung des Untergrund-E-Moduls wurde von der Arbeitsgemeinschaft universitärer FWD Betreiber (AUF) [22] anhand einer Sensitivitätsanalyse dargestellt. Es kann nicht bestimmt werden, ob die Deflexion D_{1800} exakt dem E-Modul des Untergrunds auf dem Planum (Verformungsmodul E_{v2}) entspricht. Es wurde daher festgelegt, dass die Deflexion D_{1800} dem E-Modul einer Unterlage für den Oberbau entspricht. Die Unterlage für den Oberbau kann über dem Planum in der ToB oder unterhalb des Planums im Untergrund liegen. Die zuvor beschriebenen Abhängigkeiten zeigen aber, dass sich die Unterlage in unmittelbarer Nähe des Planums befinden muss. Diese Annahme wird auch durch die in Diagramm 7.3 dargestellte Häufigkeitsverteilung, von gemessenem Untergrund-E-Moduln aus der Datenbank des Institutes für Straßenbau und Verkehrswesen der Universität Duisburg-Essen mit dem FWD unterstützt. Es wird deutlich, dass Untergrund-E-Moduln unterhalb von 115 MN/m², welche dem dynamischen Mindest-Verformungsmodul des Planums entsprechen, nur selten vorkommen.

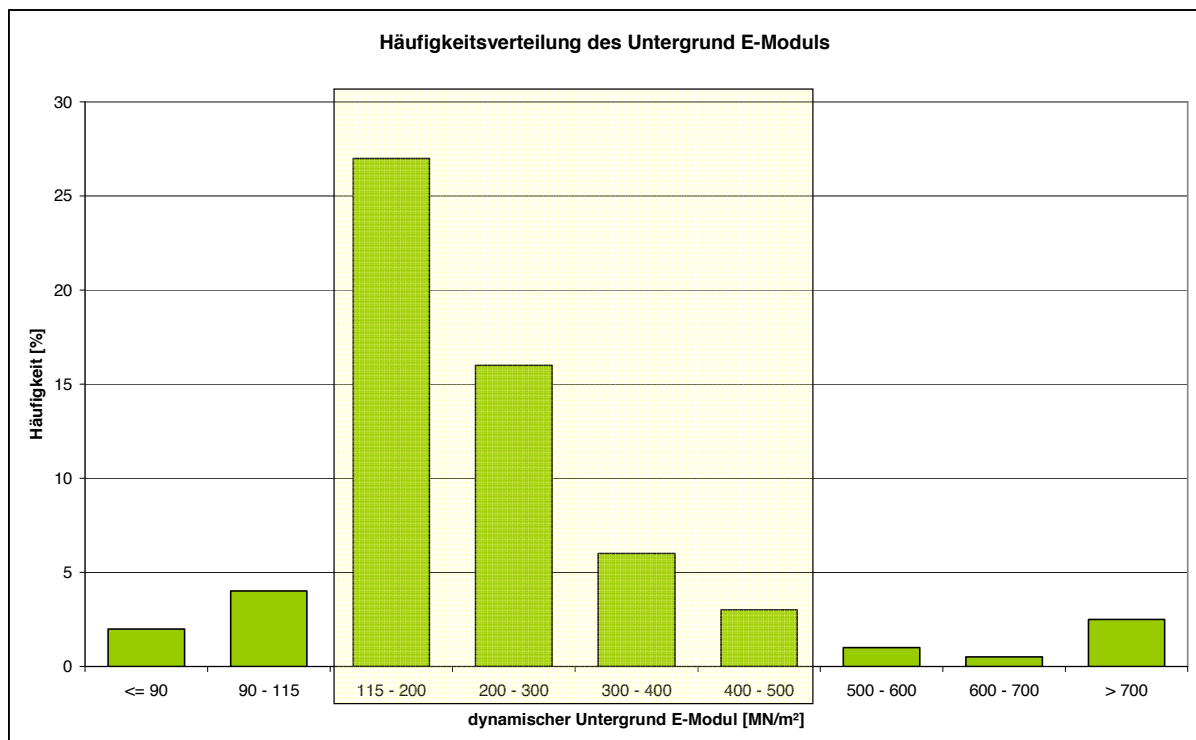


Diagramm 7.3: Häufigkeitsverteilung gemessener Untergrund-E-Moduln (Bettungsmoduln E_0) mit dem FWD

Die Arbeitsgemeinschaft universitärer FWD Betreiber (AUF) [22] bezeichnet die Unterlage einer Asphaltstraßenbefestigung als Bettung. Der anhand der Deflexion D_{1800} bestimmte Untergrund-E-Modul wird als Bettungsmodul E_0 bezeichnet. Die Tragfähigkeit der Bettung, ausgedrückt durch den Bettungsmodul E_0 , wird aus der gemess-

senen Deflexion D_{1800} mit einem Mehrschichtenprogramm zurückgerechnet. Der zuvor festgelegte Standard-Bettungsmodul von $E_0 = 115 \text{ MN/m}^2$ entspricht einer Deflexion von $D_{1800} = 0,07 \text{ mm}$.

7.3 Einfluss des Bettungsmoduls

Der Bettungsmodul beeinflusst den gesamten Verlauf der Deflexionsmulde. Im Diagramm 7.2 sind exemplarisch berechnete Deflexionsmulden mit unterschiedlichen Bettungsmoduln für einen Oberbaumodul $E_A = 10.000 \text{ MN/m}^2$ dargestellt. Der Bettungsmodul wurde zwischen 10 MN/m^2 und 250 MN/m^2 variiert. Die Deflexionen werden mit kleiner werdendem Bettungsmodul größer. Die Deflexionen entwickeln sich nicht linear mit der zur Änderung des Bettungsmoduls. Die Zunahme der Deflexionen wird mit kleiner werdendem Bettungsmodul größer.

Die in der Praxis gemessenen Bettungsmoduln liegen zwischen 115 MN/m^2 und 500 MN/m^2 . In Diagramm 7.3 ist die Häufigkeitsverteilung von gemessenen Bettungsmoduln aus der Datenbank des Institutes für Straßenbau und Verkehrswesen der Universität Duisburg-Essen mit dem FWD dargestellt. Es wird deutlich, dass Bettungsmoduln außerhalb dieses Bereiches nur selten vorkommen. Liegt der gemessene Bettungsmodul unterhalb von $E_0 = 115 \text{ MN/m}^2$, ist die Tragfähigkeit der gesamten Asphaltstraßenbefestigung nicht ausreichend und wird der Tragfähigkeitsklasse F zugeordnet. Die nachfolgenden Betrachtungen werden für einen Bettungsmodul Bereich von $E_0 = 115 - 500 \text{ MN/m}^2$ durchgeführt.

7.4 Virtuelle Verschiebung der Deflexionsmulde auf den Standard Bettungsmodul

Aufgrund der erkennbaren Systematik und den dargestellten Abhängigkeiten in Abschnitt 7.2 und 7.3 ist die Untergrundkorrektur anhand einer virtuellen Verschiebung der gemessenen Deflexionsmulde auf den Standard Bettungsmodul möglich. Hierzu müssen die gemessenen Deflexionen für alle neun Geofone soweit vergrößert werden, bis die Deflexionen einem Bettungsmodul von $E_0 = 115 \text{ MN/m}^2$ entsprechen.

Im Diagramm 7.4 ist eine berechnete Deflexionsmulde mit einem beliebigen Bettungsmodul ($> 115 \text{ MN/m}^2$) in schwarz (Mulde 1) und eine zweite berechnete Deflexionsmulde in rot (Mulde 2) mit dem Standard-Bettungsmodul $E_0 = 115 \text{ MN/m}^2$ bzw. $D_{1800} = 0,07 \text{ mm}$ dargestellt. Die Differenz der Deflexion D_{1800} zwischen den beiden Deflexionsmulden ist mit X_{1800} bezeichnet ($X_{1800} = D_{1800,M2} - D_{1800,M1}$). Die E-Moduln

der restlichen Schichten und die Schichtdicken sind für beide Deflexionsmulden gleich. Die beiden Deflexionsmulden unterscheiden sich somit nur durch den Bettungsmodul.

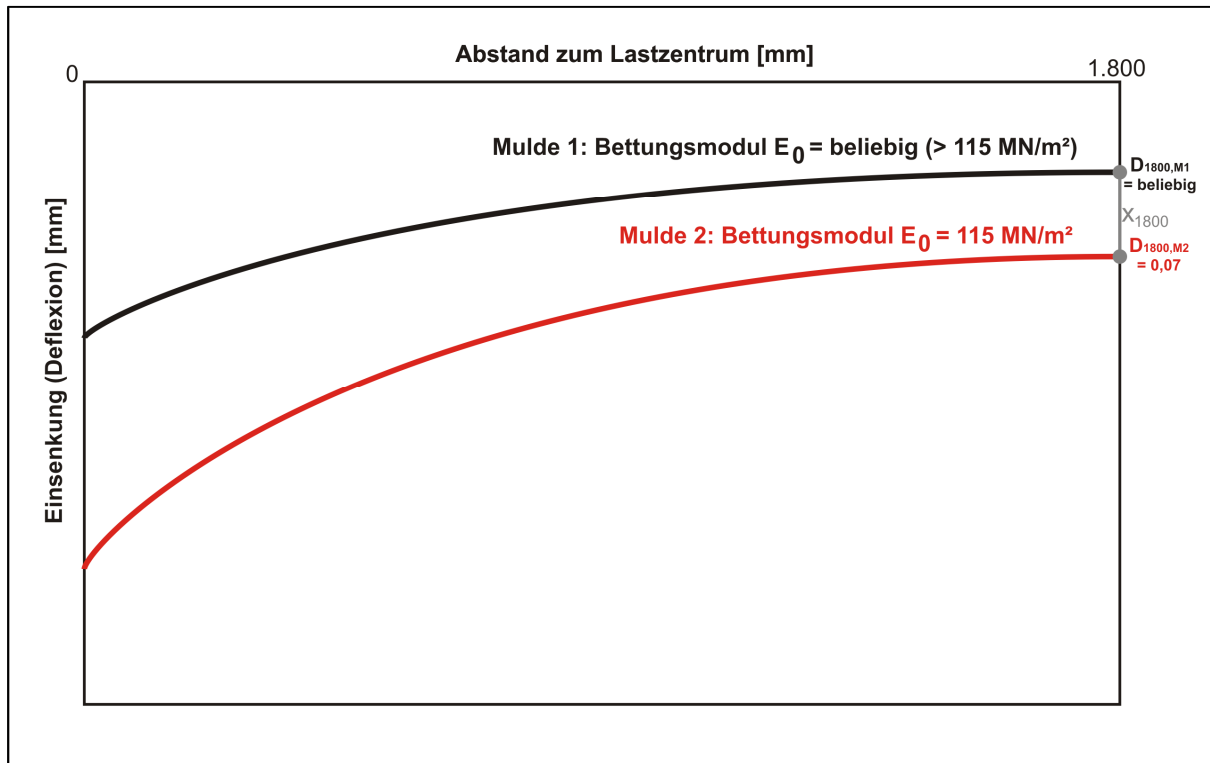


Diagramm 7.4: Deflexionsverlauf aufgrund unterschiedlicher Bettungsmoduln

Im Diagramm 7.5 ist zusätzlich zu den beiden dargestellten Deflexionsmulden noch eine parallel verschobene Deflexionsmulde der Mulde 1 auf den Standard-Bettungsmodul von $E_0 = 115 \text{ MN/m}^2$ in blau dargestellt. Dazu wurden die vorhandenen Deflexionen an allen neun Geofonen der Mulde 1 mit X_{1800} addiert. Es wird deutlich, dass die parallel verschobene Deflexionsmulde nicht dem Verlauf der berechneten Deflexionsmulde (Mulde 2) entspricht. Der Unterschied zwischen der parallel verschobenen Deflexionsmulde (blau) und der gerechneten Deflexionsmulde (Mulde 2) ist als graue Fläche dargestellt.

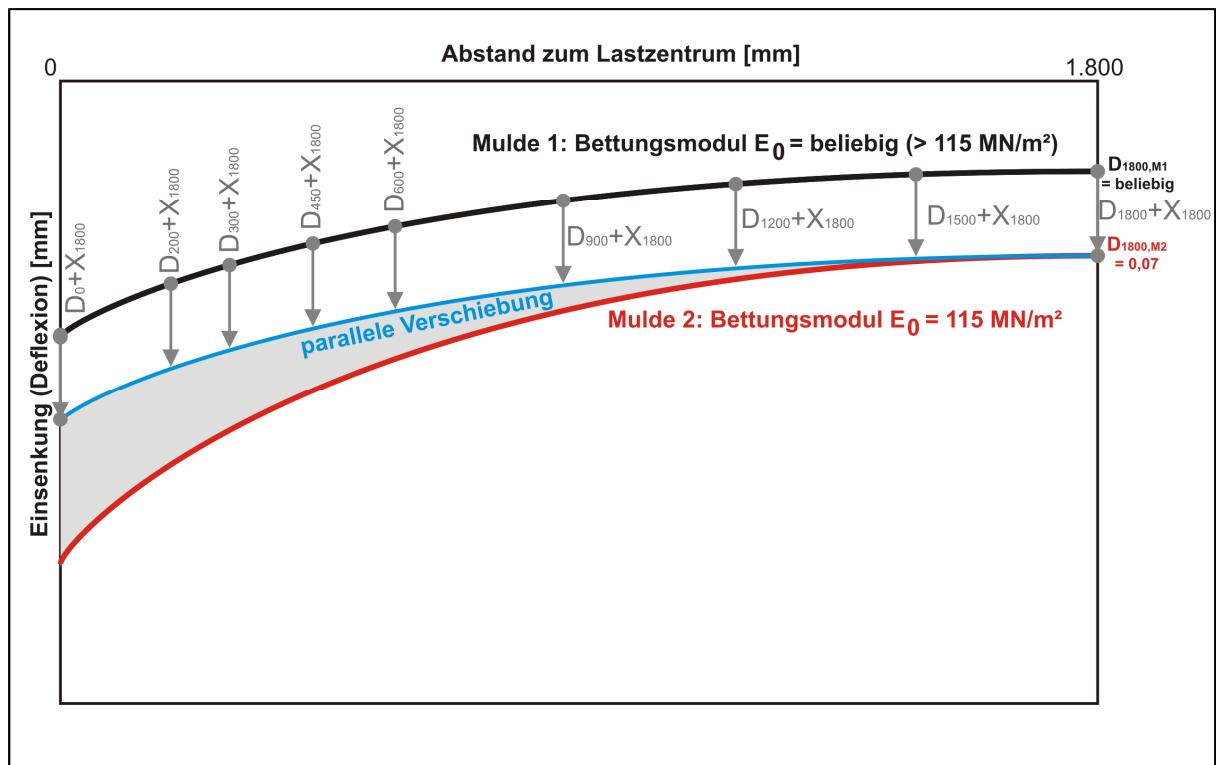


Diagramm 7.5: Einfache Verschiebung der Deflexionen

Die Verschiebung der Deflexionsmulde kann daher nicht wie beschrieben parallel erfolgen, da die erforderliche Größe des Verschiebungsweges abhängig vom Abstand zum Lastzentrum (Geofon) ist. Die Vergrößerung der Deflexion erfolgt daher in Abhängigkeit vom Geofon und wird als ungleichmäßige Verschiebung bezeichnet. Der Ansatz der ungleichmäßigen Verschiebung wird nachfolgend beschrieben.

Um den Verlauf der Mulde 2 durch die Untergrundkorrektur genau nachbilden zu können und somit den als graue Fläche dargestellten Fehler zu eliminieren, muss die Mulde 1 in Abhängigkeit vom Geofon verschoben werden (ungleichmäßige Verschiebung). Wie im Diagramm 7.6 dargestellt, sind die einzelnen Abstände zwischen den beiden Deflexionsmulden für jedes Geofon unterschiedlich groß. Der Abstand nimmt mit kleiner werdendem Abstand zum Lastzentrum zu und wird im Rahmen dieser Arbeit als Abfallen der Deflexionsmulde bezeichnet.

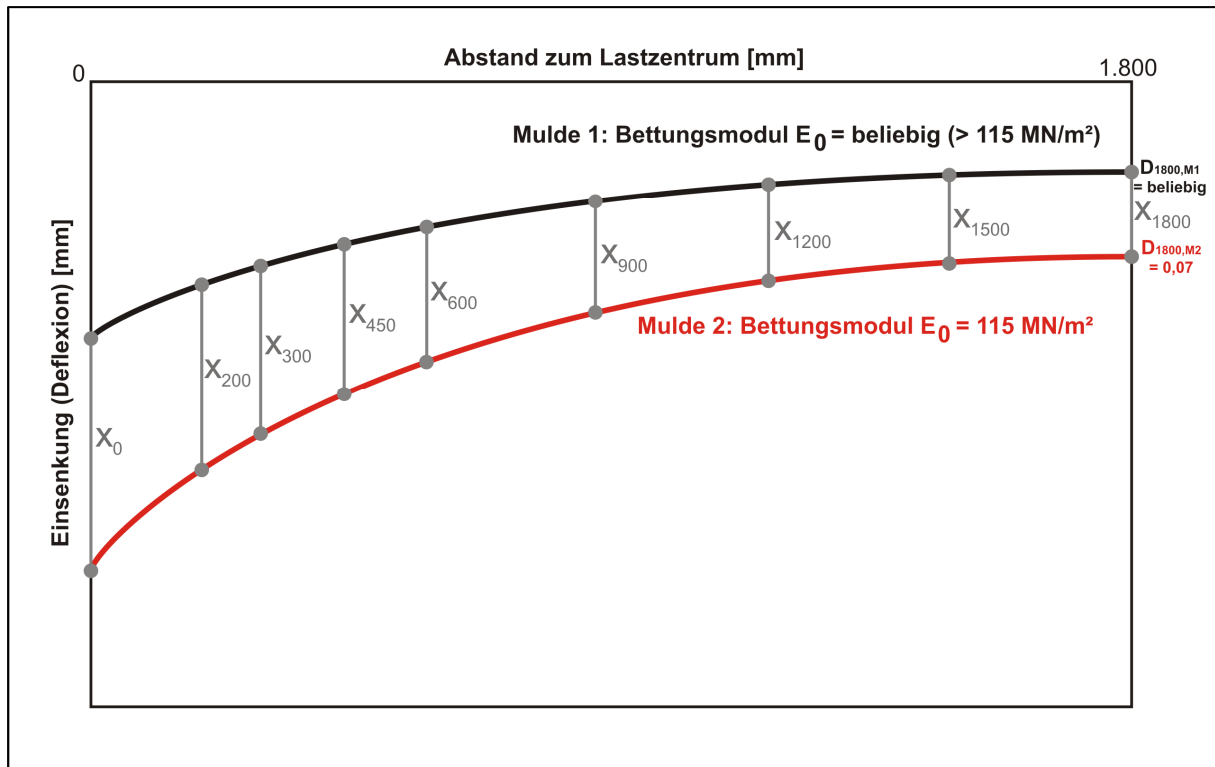


Diagramm 7.6: Unterschiedliche Abstände zwischen den Deflexionen

Der grundlegende Ansatz der ungleichmäßigen Verschiebung ist in Diagramm 7.7 dargestellt. Die einzelnen Deflexionen werden um den Abstand X_{1800} , welcher mit einem entsprechenden Faktor α_i (Verschiebungsfaktor) multipliziert wird, vergrößert. Der Abstand X_{1800} entspricht dabei dem erforderlichen Verschiebungsweg am letztem Geofon, um die Deflexionsmulde auf den Standard Bettungsmodul zu verschieben. Der Verschiebungsfaktor α_i ist für jedes Geofon unterschiedlich und wird zum Lastzentrum hin größer.

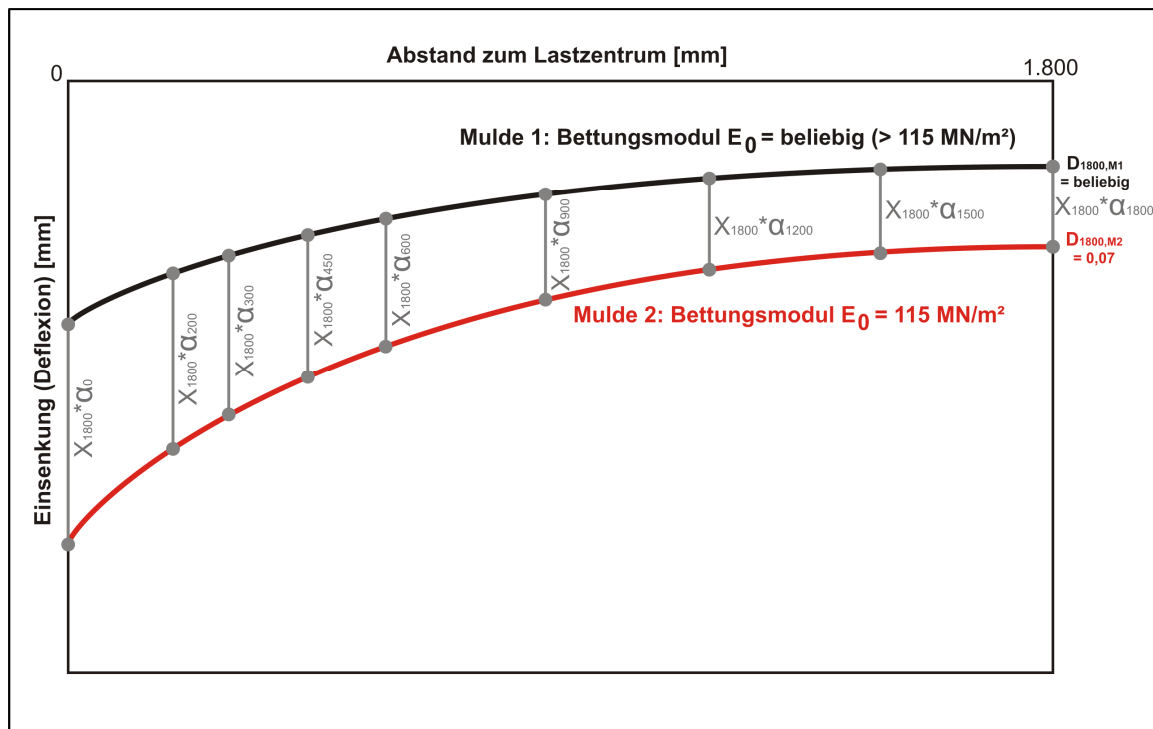


Diagramm 7.7: Verschiebung mit Verschiebungsfaktoren

Der im Diagramm 7.7 dargestellte Ansatz zeigt lediglich das grundlegende Prinzip der ungleichmäßigen Verschiebung mit Hilfe von Verschiebungsfaktoren. Der in dieser Arbeit aufgestellte Ansatz zur Untergrundkorrektur mit Hilfe der ungleichmäßigen Verschiebung der Deflexionsmulde ist in Diagramm 7.8 dargestellt.

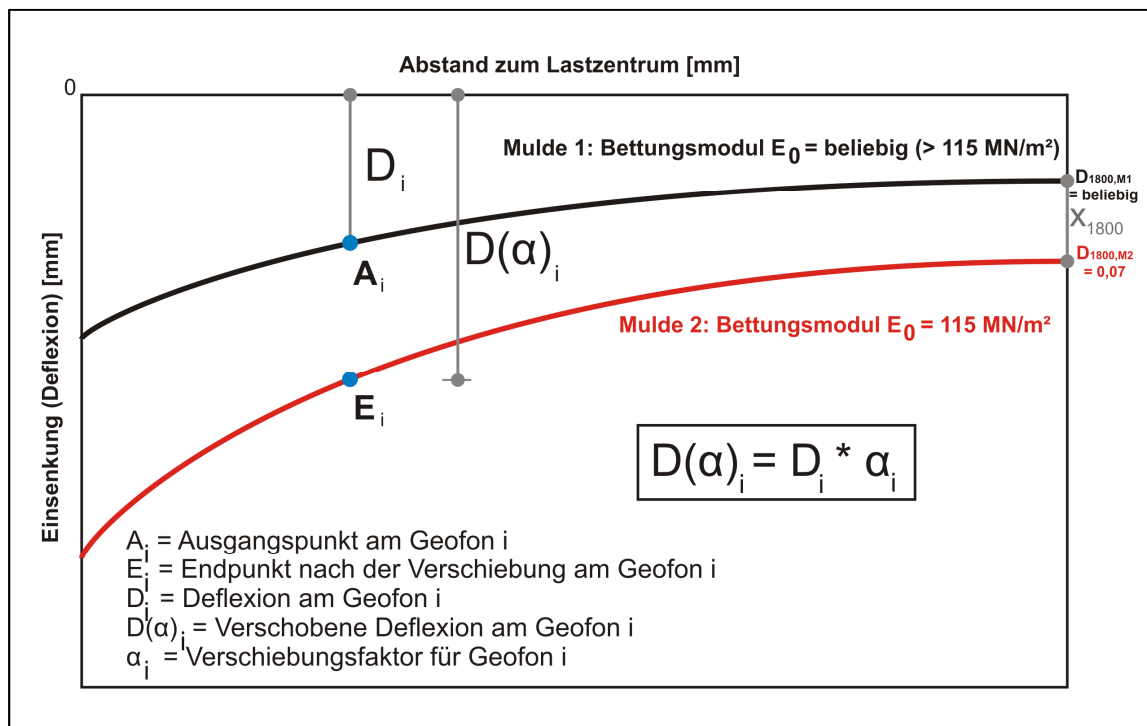


Diagramm 7.8: Ansatz der Untergrundkorrektur - Ungleichmäßigen Verschiebung

Für die ungleichmäßige Verschiebung werden die gemessenen Deflexionen aller Geofone mit einem passenden Verschiebungsfaktor multipliziert (7.1) und hierdurch soweit vergrößert, bis sie dem Standard-Bettungsmodul von 115 MN/m^2 entsprechen.

$$D(\alpha)_i = D_i * \alpha_i \quad (7.1)$$

Die für die ungleichmäßige Verschiebung benötigten Verschiebungsfaktoren lassen sich anhand von berechneten Deflexionsmulden bestimmen.

Zur Bestimmung der Verschiebungsfaktoren werden mindestens zwei berechnete Deflexionsmulden benötigt. Die erste Deflexionsmulde wird für den Standard-Bettungsmodul berechnet (Standard-Bettungsmodul-Mulde). Die restlichen Deflexionsmulden werden für einen beliebigen Bettungsmodul berechnet (beliebige Mulden). Die sonstigen Randbedingungen, wie die Schichtdicken und der Oberbaumodul, sind für alle berechneten Deflexionsmulden gleich. Die benötigten Verschiebungsfaktoren werden über das Verhältnis der Deflexionen der beliebigen Mulden zur Standard-Bettungsmodul-Mulde berechnet. Dazu werden die Deflexionen für jedes Geofon der beliebigen Mulden durch die Deflexionen der zugehörigen Geofone der Standard-Bettungsmodul-Mulde dividiert (7.2).

$$\alpha_i = \frac{D(\alpha)_i}{D_i} \quad (7.2)$$

Die berechneten Verschiebungsfaktoren ermöglichen, wie in Diagramm 7.8 dargestellt, die ungleichmäßigen Verschiebungen durch Vergrößerung der einzelnen Deflexionen. Dabei ist zu beachten, dass für jede beliebige Deflexionsmulde mit unterschiedlichen Bettungsmoduln eigene Verschiebungsfaktoren berechnet werden müssen. Die erstellten Verschiebungsfaktoren erlauben nur die Verschiebung von Deflexionsmulden, deren Randbedingungen den beliebigen Deflexionsmulde entsprechen. Die folgenden Randbedingungen der zu verschiebenden Deflexionsmulde müssen den Randbedingungen der beliebigen Mulde entsprechen:

- Bettungsmodul E_0
- Oberbaumodul E_A

- Schichtdicken (Belastungsklassen)

Um die Verschiebungsfaktoren für die möglichen Kombinationen der Randbedingungen zu berechnen, muss ein realistischer und praxisgerechter Bereich der einzelnen Randbedingungen festgelegt werden. Nachfolgend werden die betrachtenden Bereiche der einzelnen Randbedingungen festgelegt.

Bettungsmodul E_0 :

Ein praxisnaher Bereich des Bettungsmoduls liegt, wie bereits in Abschnitt 7.3 beschrieben, zwischen 115 MN/m^2 und 500 MN/m^2 . Dieser Bereich wird für die Untergrundkorrektur verwendet. Um die Deflexionsmulden innerhalb des aufgestellten Bereiches verschieben zu können, müssen für die Bettungsmoduln innerhalb des festgelegten Bereiches Verschiebungsfaktoren berechnet werden. Dazu werden die Verschiebungsfaktoren mit einer festgelegten Schrittweite des Bettungsmoduls berechnet. Um eine möglichst kleine Schrittweite zu erhalten und gleichzeitig die Anzahl an Verschiebungsfaktoren zu begrenzen, wurde eine Schrittweite von 5 MN/m^2 gewählt. In Diagramm 7.9 sind die Deflexionsmulden für den betrachteten Bettungsmodulbereich mit einer Schrittweite von 5 MN/m^2 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die gewählte Schrittweite zu einem sehr dichten Spektrum von Deflexionsmulden führt, welches für die Untergrundkorrektur ausreichend ist.

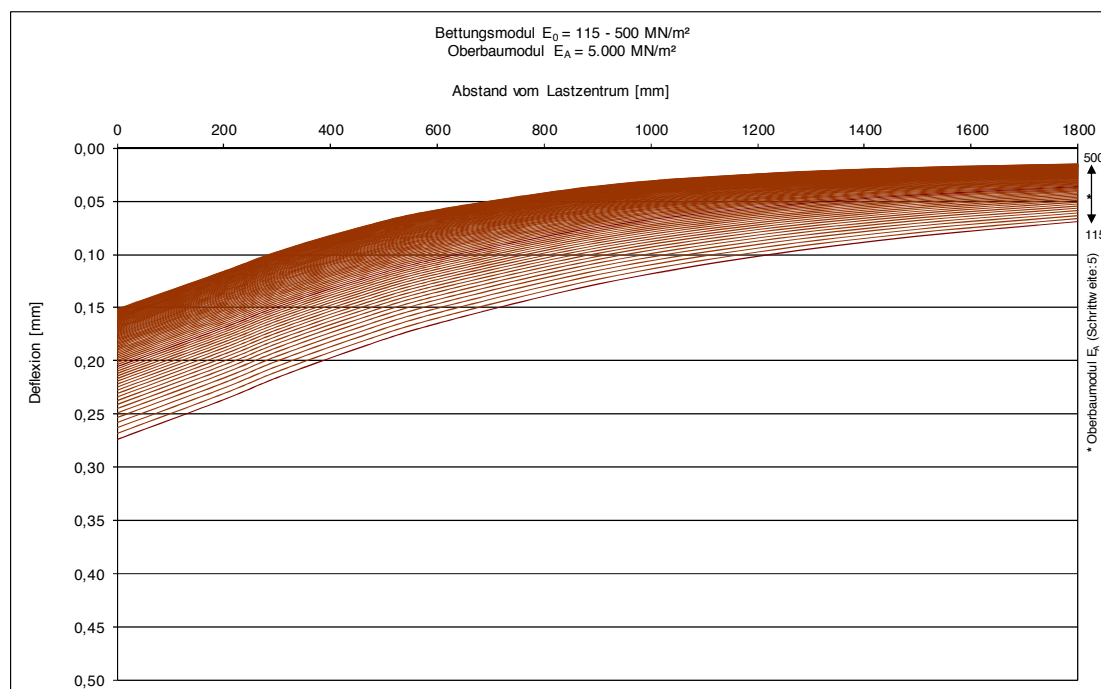


Diagramm 7.9: Deflexionsmulden mit einem Bettungsmodul Bereich $E_0 = 115 - 500 \text{ MN/m}^2$ (Schrittweite von 5 MN/m^2) und Oberbaumodul $E_A = 5.000 \text{ MN/m}^2$

Oberbaumodul E_A

Der Oberbaumodul Bereich wurde zwischen 1.000 MN/m² und 25.000 MN/m² gewählt. Dabei ist zu beachten, dass die gemessenen Deflexionsmulden auf eine Asphaltschichttemperatur von 20°C korrigiert werden und somit der Asphaltschicht-E-Modul keinem Temperatureinfluss unterliegt. Der in der Praxis bei FWD Messungen vorkommende Oberbaumodul wird durch den gewählten Bereich erfasst.

Im Diagramm 7.10 sind für eine Schrittweite des Oberbaumoduls von 1.000 MN/m² im festgelegten Bereich die berechneten Deflexionsmulden dargestellt.

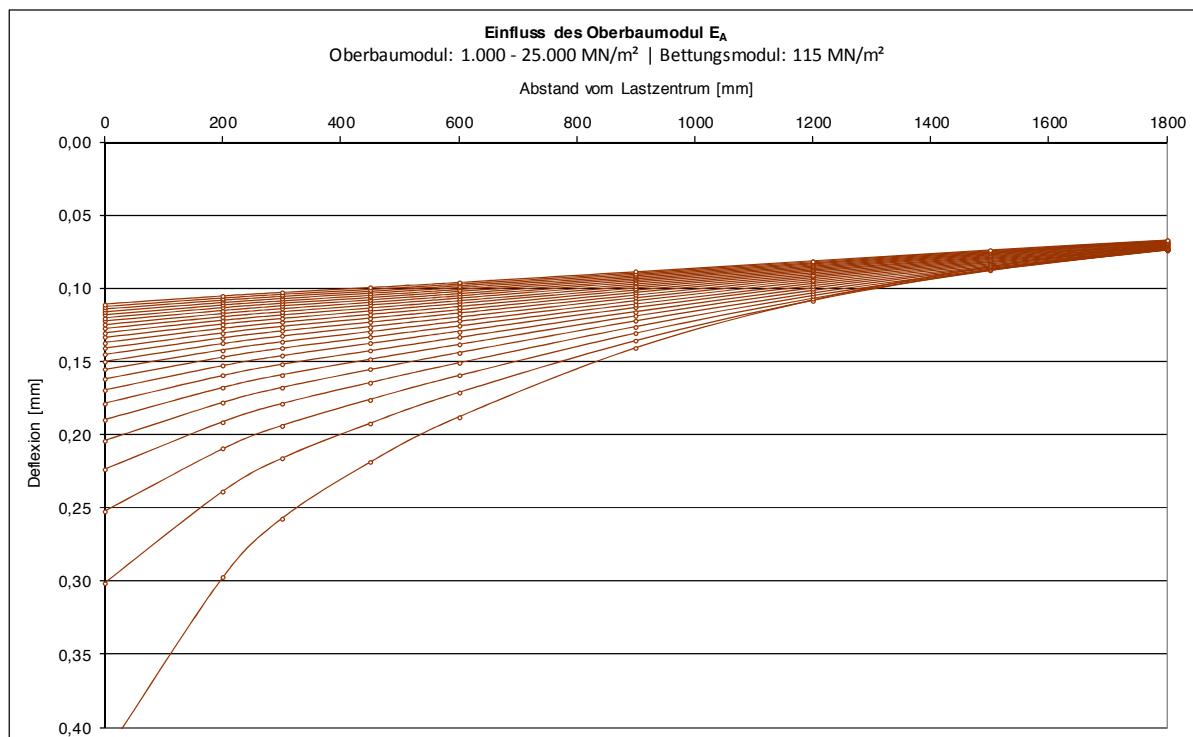


Diagramm 7.10: Deflexionsmulden mit einem Bettungsmodul $E_0 = 115 \text{ MN/m}^2$ und Oberbaumodul Bereich $E_A = 1.000 - 25.000 \text{ MN/m}^2$ (Schrittweite von 1.000 MN/m^2)

Es ist zu erkennen, dass die gewählte Schrittweite zu einem sehr dichten Spektrum von Deflexionsmulden führt, welches für die Untergrundkorrektur ausreichend ist.

Schichtdicken

Die Schichtdicken richten sich nach dem im Abschnitt 6.2.2 aufgestellten Referenzsystem. Die Verschiebungsfaktoren für die Untergrundkorrektur werden für die sieben Schichtdicken aufgestellt.

In Tabelle 7.1 sind die festgelegten Bereiche und Schrittweiten für die Verschiebungsfaktoren zusammengefasst.

Tabelle 7.1: Zusammenfassung der Verschiebungsfaktorenbereiche

Bettungsmodul E_0	Oberbaumodul E_A	Schichtdicken
$E_0 = 115 - 500 \text{ MN/m}^2$	$E_A = 1.000 - 25.000 \text{ MN/m}^2$	Anhand des Referenzsystems
Schrittweite: 5 MN/m^2	Schrittweite: 1.000 MN/m^2	
77 Bettungsmoduln	25 Oberbaumoduln	7 Schichtdicken

Für die möglichen Kombinationen der in Tabelle 7.1 dargestellten Randbedingungen müssen die Verschiebungsfaktoren berechnet werden. Es ergeben sich 13.475 Verschiebungsfaktoren ($77 \text{ Bettungsmoduln} * 25 \text{ Oberbaumoduln} * 7 \text{ Schichtdicken}$) für jedes der neun Geofone. Um die große Anzahl an Verschiebungsfaktoren den passenden gemessenen Deflexionsmulden zuordnen zu können, ist die Erarbeitung einer einfachen Zuordnungsmöglichkeit erforderlich.

Die Zuordnung der Verschiebungsfaktoren zum Bettungsmodul ist mit Hilfe der Deflexion D_{1800} möglich. Wie in Abschnitt 6.1.2 beschrieben, wirkt sich die Schichtdicke und der Oberbaumodul identisch auf den Verlauf der Deflexionsmulde im vorderen Bereich aus. Es ist keine getrennte Auswahl der Verschiebungsfaktoren aufgrund des Oberbaumoduls und der Oberbaudicke möglich. Für die Untergrundkorrektur ist es aber unerheblich, ob sich der Verlauf der Deflexionsmulde im vorderen Bereich aufgrund des Oberbaumoduls oder der Oberbaudicke verändert. Es ist lediglich die Berücksichtigung unterschiedlicher Verläufe im vorderen Bereich der Deflexionsmulde erforderlich, da diese die Verschiebungsfaktoren beeinflussen. Der Oberbaumodul beeinflusst den vorderen Bereich in einem größeren Spektrum als die Oberbaudicke. Die Erstellung der Verschiebungsfaktoren erfolgt nachfolgend daher ausschließlich über eine Veränderung des Oberbaumoduls. Die Oberbaudicke wird für alle Verschiebungsfaktoren konstant gewählt. Die Anzahl der Verschiebungsfaktoren reduziert sich somit auf 1.925 Verschiebungsfaktoren ($77 \text{ Bettungsmoduln} * 25 \text{ Oberbaumoduln}$) für jedes der neun Geofone.

Um die passenden Verschiebungsfaktoren zum vorhandenen Oberbaumodul auswählen zu können, wird der Verlauf im vorderen Bereich der Deflexionsmulde betrachtet. Hierzu werden im Abschnitt 7.5 Oberbaubereiche erstellt. Den Oberbaubereichen können die gemessenen Deflexionsmulden zugeordnet und hierdurch die passenden Verschiebungsfaktoren ausgewählt werden.

Für jeden Oberbaubereich wird nachfolgend eine Tafel erstellt, welche die Verschiebungsfaktoren für alle Bettungsmoduln enthält, vgl. Tabelle 7.2. Es entstehen insgesamt 25 Tafeln (25 Oberbaubereiche), die jeweils 77 Zeilen mit Verschiebungsfaktoren (77 Bettungsmoduln) für alle neun Geophone enthalten.

Tafel (Oberbaubereich)	
Bettungsmodul	Geophonabstände
	Verschiebungsfaktoren

Tabelle 7.2: Schema einer Tafel mit Verschiebungsfaktoren

Die passende Tafel wird aufgrund des Verlaufes der Deflexionsmulde im vorderen Bereich (Einfluss des Oberbaumoduls) ausgewählt. Die Tafeln enthalten für jeden Bettungsmodul des betrachtenden Bereiches eine Zeile mit Verschiebungsfaktoren. Die Auswahl der Zeile mit den passenden Verschiebungsfaktoren erfolgt über die Deflexion D_{1800} , vgl. Tabelle 7.3. In der ausgewählten Zeile stehen für jede Geophonposition die passenden Verschiebungsfaktoren.

Tafel (Oberbaubereich)	
Bettungsmodul	Geophonabstände
	Verschiebungsfaktoren
Bettungsmodul	Zeile auswählen
	Verschiebungsfaktoren

Tabelle 7.3: Auswahl der Verschiebungsfaktoren anhand des Bettungsmoduls

7.5 Definition der Oberbaubereiche

Die Oberbaubereiche ermöglichen die Zuordnung von gemessenen Deflexionsmulden zu einem Oberbaumodul. Der Verlauf der gemessenen Deflexionsmulden wird hierzu mit Deflexionsmulden, die für unterschiedliche Bettungsmoduln berechnet wurden, verglichen. Der Vergleich wird mit Hilfe eines Diagrammes, welches die berechneten Deflexionsmulden für unterschiedliche Oberbaumoduln enthält, durchgeführt. In Diagramm 7.11 sind hierzu exemplarisch berechnete Deflexionsmulden für den in Abschnitt 7.4 festgelegten Oberbaumodul Bereich dargestellt.

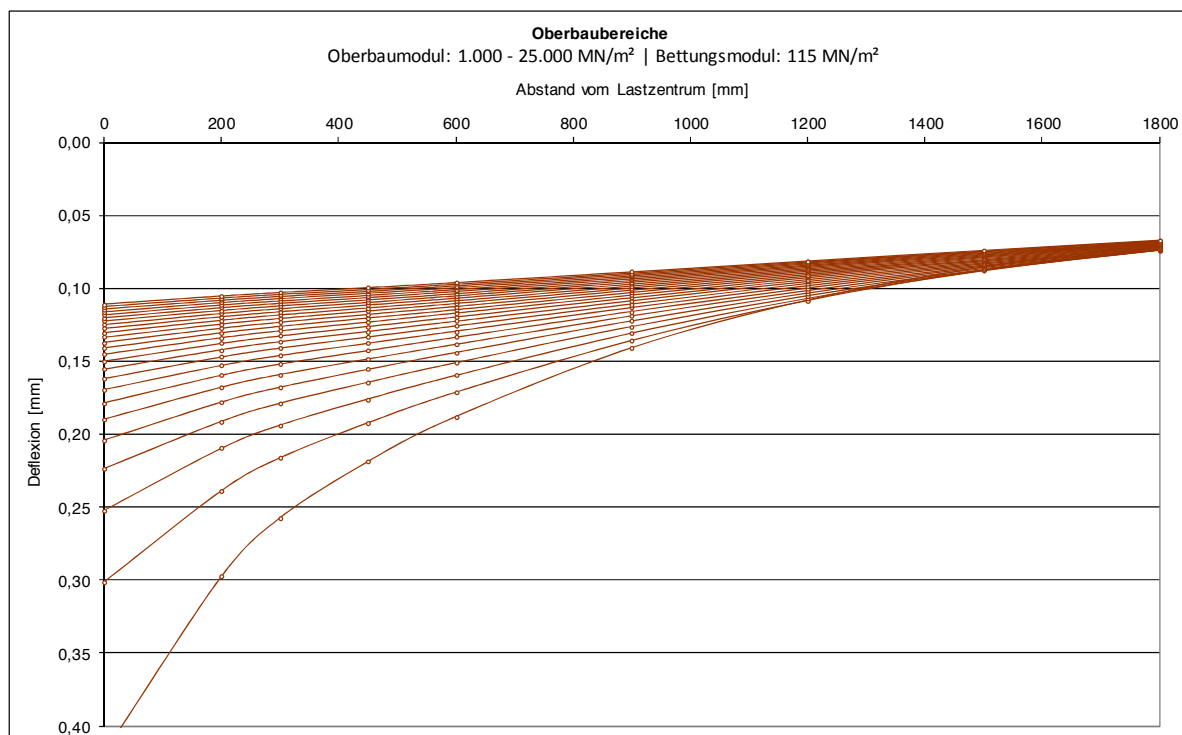


Diagramm 7.11: Oberbaubereiche mit einem Bettungsmodul $E_0 = 115 \text{ MN/m}^2$ und Oberbaumodul Bereich $E_A = 1.000 - 25.000 \text{ MN/m}^2$ (Schrittweite von 1.000 MN/m^2)

Der Verlauf der gemessenen Deflexionsmulde wird im vorderen Bereich mit dem Verlauf der berechneten Deflexionsmulden in Diagramm 7.11 verglichen und kann somit einer gemessenen Deflexionsmulde zugeordnet werden. Durch die Zuordnung können der Oberbaumodul der gemessenen Deflexionsmulde und die dazu passenden Verschiebungsfaktoren bestimmt werden. Bei der Definition der Oberbaubereiche müssen die Randbedingungen Oberbaumodul, Bettungsmodul und Schichtdicken berücksichtigt werden.

7.5.1 Berücksichtigung des Bettungsmoduls

Bei der Definition der Oberbaubereiche muss der Einfluss des Bettungsmoduls berücksichtigt werden. Wie in Abschnitt 7.2 beschrieben, wirkt sich der Bettungsmodul

auf den gesamten Verlauf der Deflexionsmulde aus. In Diagramm 7.12 sind exemplarisch die Oberbaubereiche für einen Bettungsmodul von 115 MN/m^2 und 500 MN/m^2 dargestellt.

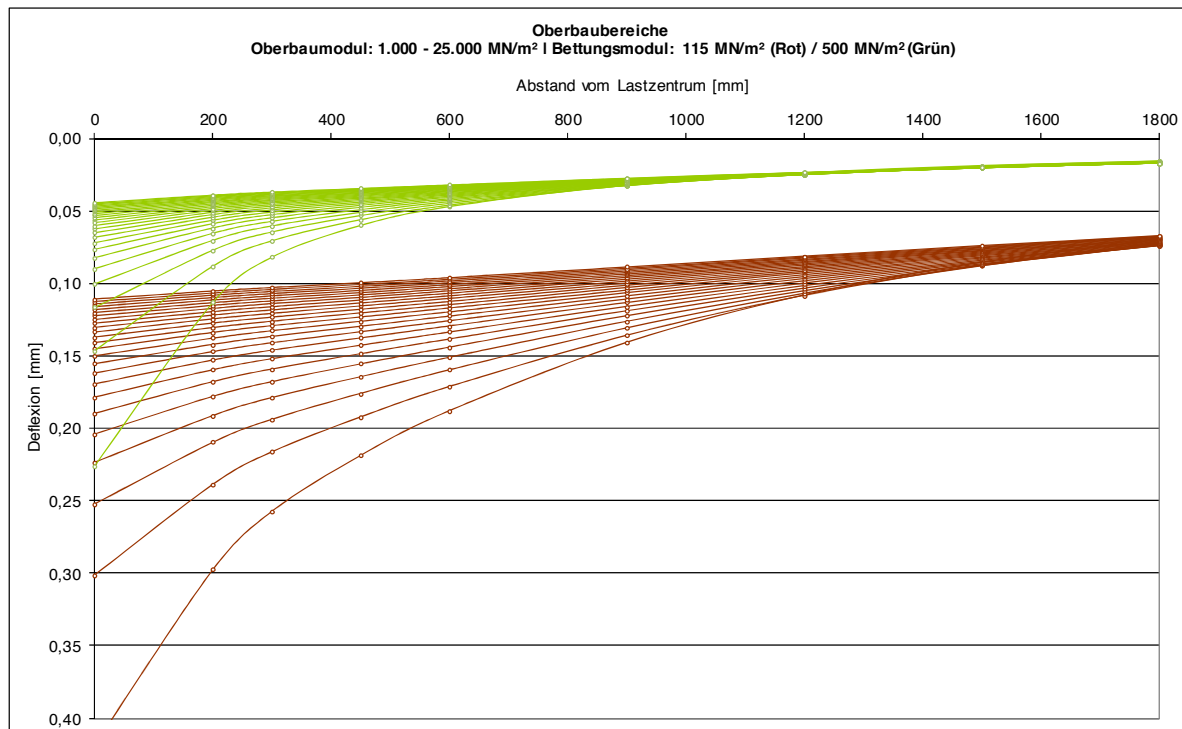


Diagramm 7.12: Oberbaubereiche für zwei Bettungsmoduln ($115 / 500 \text{ MN/m}^2$)

Der Einfluss des Bettungsmoduls auf die Oberbaubereiche ist in Diagramm 7.12 deutlich zu erkennen. Die aufgestellten Oberbaubereiche ermöglichen die Bestimmung des Oberbaumoduls nur für gemessene Deflexionsmulden, welche den gleichen Bettungsmodul wie der Oberbaubereiche haben. Um die Zuordnung der gemessenen Deflexionsmulden mit unterschiedlichen Bettungsmoduln zu ermöglichen, müssen die Oberbaubereiche für alle Bettungsmoduln des betrachtenden Bereiches definiert werden.

7.5.2 Berücksichtigung der Oberbaudicke

Die Erstellung der Oberbaubereiche erfolgt anhand der Schichtdicken des Referenzsystems. In Abbildung 6.1 sind die Schichtdicken des Referenzsystems für verschiedene Tragfähigkeitsklassen dargestellt. Wie in Abschnitt 6.1.1 beschrieben, wird der Verlauf der Deflexionsmulden im vorderen Bereich nicht über die Veränderung der Oberbaudicke verändert. Die Oberbaubereiche werden daher für eine festgelegte Schichtdicke des Referenzsystems berechnet. Die Oberbaubereiche werden für die Schichtdicken der Tragfähigkeitsklasse A erstellt, da diese die kleinsten Deflexionen

im vorderen Bereich der Deflexionsmulde erzeugt. Dies hat den Vorteil, dass größere Deflexionen im vorderen Bereich der berechneten Deflexionsmulde ausschließlich über den gewählten Oberbaumodul-bereich erzeugt werden können, vgl. Diagramm 7.13. Die Berechnung der Oberbaubereiche mit einer kleineren Schichtdicke des Referenzsystems hätte zudem den Nachteil, dass geringere Deflexionen im vorderen Bereich der Deflexionsmulde nicht durch eine Veränderung des Oberbaumoduls berechnet werden können, vgl. Diagramm 7.14.

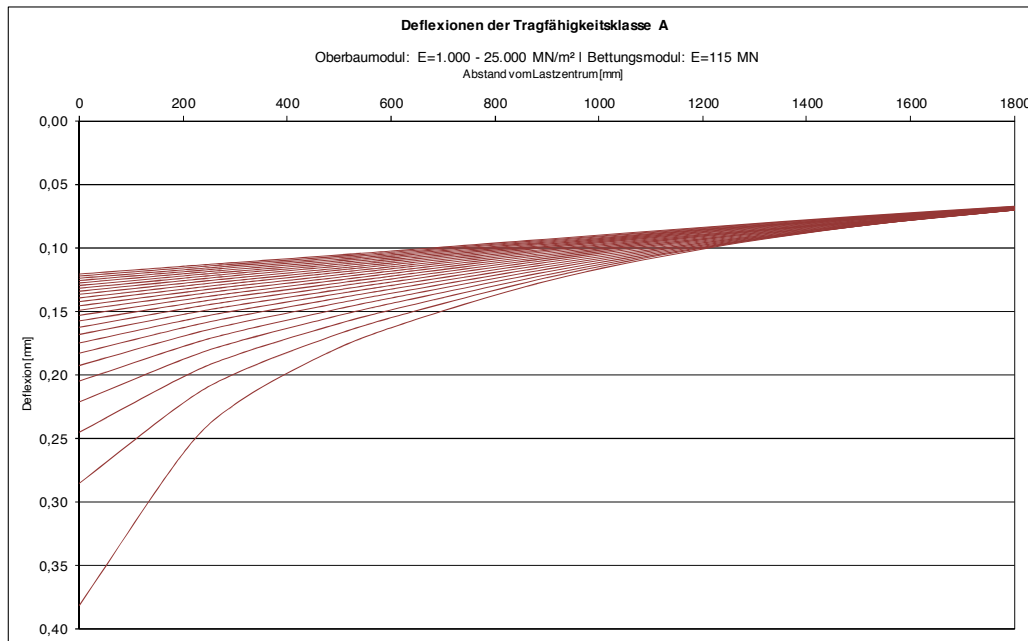


Diagramm 7.13: Deflexionen bei Schichtdicken der Tragfähigkeitsklasse A

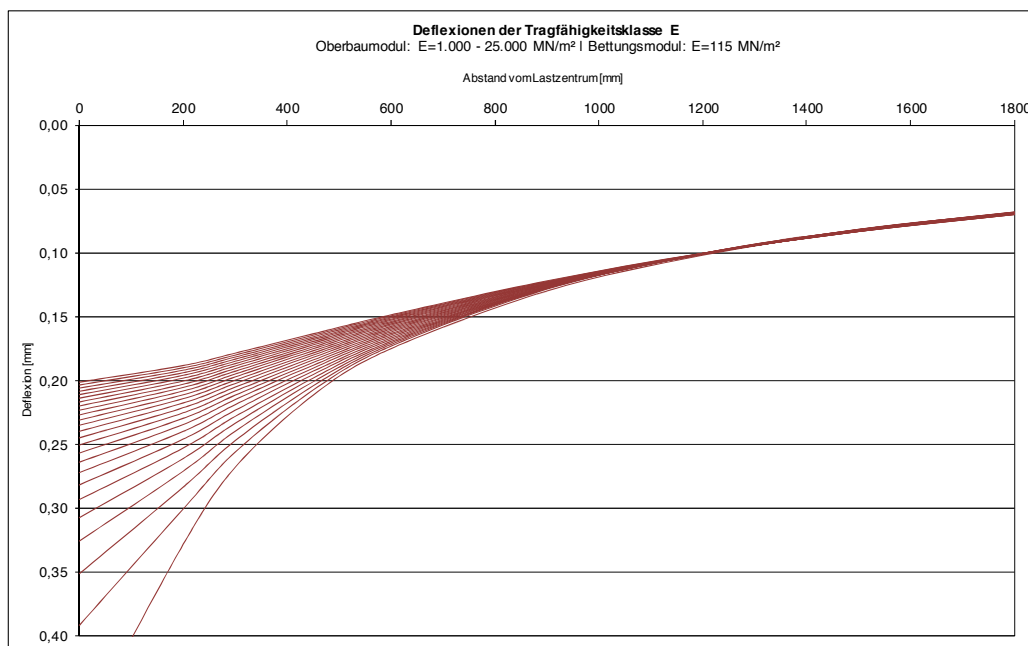


Diagramm 7.14: Deflexionen bei Schichtdicken der Tragfähigkeitsklasse E

7.5.3 Aufstellung der Oberbaubereiche

Nachfolgend wird ein zeichnerischer und ein rechnerischer Ansatz zur Definition und Verwendung der Oberbaubereiche vorgestellt.

7.5.3.1 Ansatz mit zeichnerischer Oberbaubereichseinteilung (Zeichnerischer Ansatz)

Der in Abschnitt 7.4 vorgestellte Ansatz zur Untergrundkorrektur lässt die Verschiebung einer gemessenen Deflexionsmulde auf den Standard-Bettungsmodul zu. Die Zuordnung der gemessenen Deflexionsmulde zum Oberbaubereich ist dabei in vielen Fällen nur schwer möglich. Der Verlauf der gemessenen Deflexionsmulden ist ungleichmäßiger als die der berechneten Deflexionsmulden, welches die Zuordnung der gemessenen Deflexionsmulde zum Oberbaubereich erschwert. In Diagramm 7.15 ist eine beliebige gemessene Deflexionsmulde (blaue Linie) in die Oberbaubereiche eingezeichnet. Die gemessene Deflexionsmulde (blaue Linie) kann einer der berechneten Deflexionsmulden (rote Linien) zugeordnet werden.

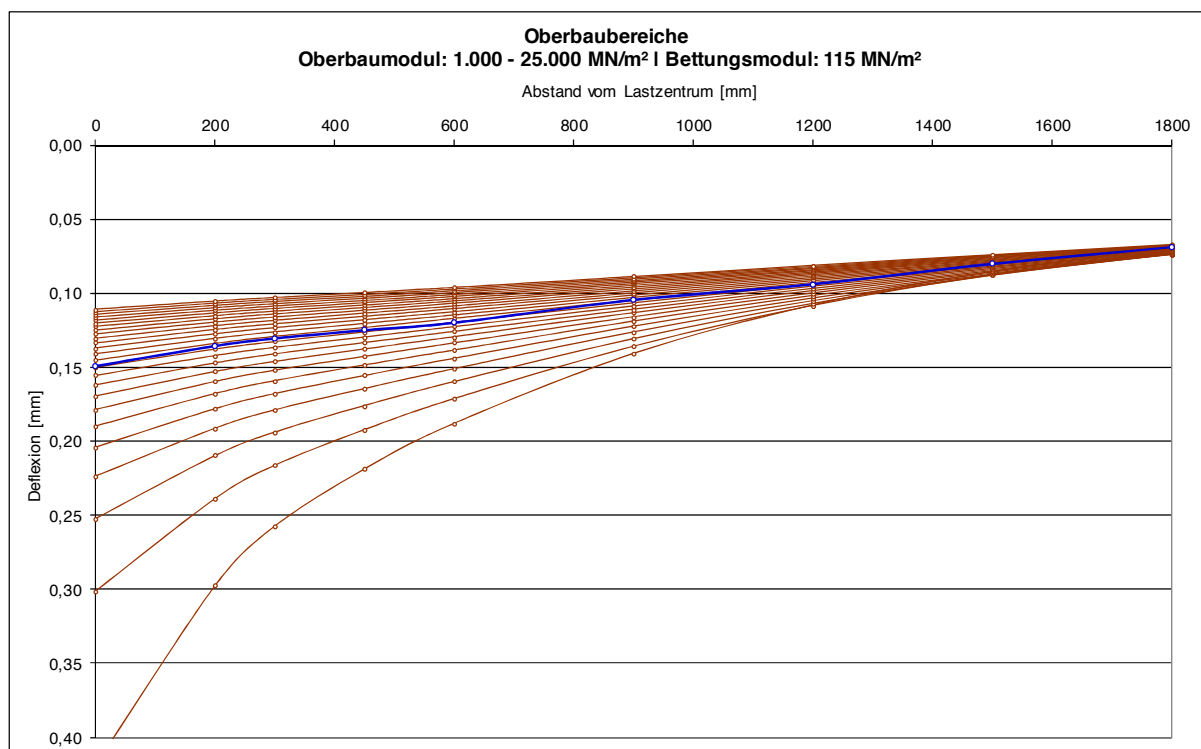


Diagramm 7.15: Bestimmung des Oberbaubereichs (ungleichmäßiger Verlauf)

Für die nachfolgende Untergrundkorrektur dienen die Oberbaubereiche lediglich zur Auswahl der passenden Verschiebungsfaktoren und nicht zur eindeutigen Bestimmung des Oberbaumoduls. Dies wäre aufgrund des identischen Einflusses von Schichtdicke und Oberbaumodul auf den Verlauf der Deflexionsmulde im vorderen Bereich auch nicht möglich. Für die Auswahl der Verschiebungsfaktoren ist aber die

Bestimmung des Oberbaumoduls nicht notwendig. Es genügt, den Verlauf der gemessenen Deflexionsmulde im vorderen Bereich zu berücksichtigen. Da keine exakte Bestimmung des Oberbaumoduls erforderlich ist, kann die Anzahl der Oberbaubereiche verkleinert, bzw. die einzelnen Oberbaubereiche vergrößert werden. Durch eine Vergrößerung der Oberbaubereiche wird die Zuordnung der gemessenen Deflexionsmulde zum Oberbaubereich vereinfacht. Der Aufwand der Untergrundkorrektur wird zusätzlich reduziert und vereinfacht, da sich die Anzahl der Oberbaubereiche und damit auch die Anzahl der Tafeln mit Verschiebungsfaktoren reduziert.

7.5.3.1.1 Vergrößerung der Oberbaubereiche

Durch die Vergrößerung der Oberbaubereiche soll die Zuordnung der gemessenen Deflexionsmulde erleichtert werden. Die vergrößerten Oberbaubereiche sind in Diagramm 7.16 (rote Linien) dargestellt. Die aufgestellten Oberbaubereiche entsprechen der nachfolgenden Aufteilung:

Oberbaubereich 1: 1.000 – 2.000 MN/m²

Oberbaubereich 2: 2.000 – 4.000 MN/m²

Oberbaubereich 3: 4.000 – 8.000 MN/m²

Oberbaubereich 4: 8.000 – 15.000 MN/m²

Oberbaubereich 5: 15.000 – 25.000 MN/m²

Die Aufteilung wurde gewählt, um möglichst gleich große Oberbaubereiche zu erstellen, welche eine klare Zuordnung der gemessenen Deflexionsmulde ermöglichen.

Die Zuordnung einer beliebigen gemessenen Deflexionsmulde ist in Diagramm 7.16 (blaue Linie) für die Oberbaubereiche exemplarisch dargestellt. Durch die Vergrößerung der Oberbaubereiche ist eine eindeutige Zuordnung der gemessenen Deflexionsmulde zu einem Oberbaubereich möglich.

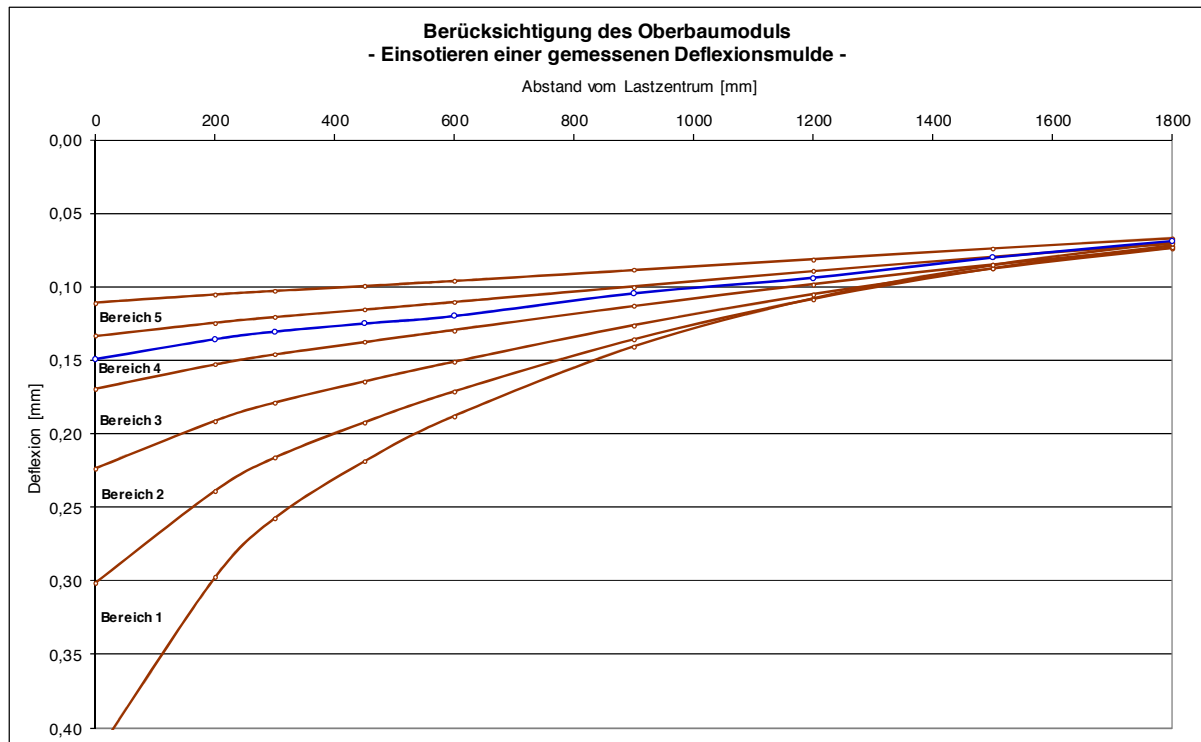


Diagramm 7.16: Zuordnung der gemessenen Deflexionsmulde zu den vergrößerten Oberbaubereichen

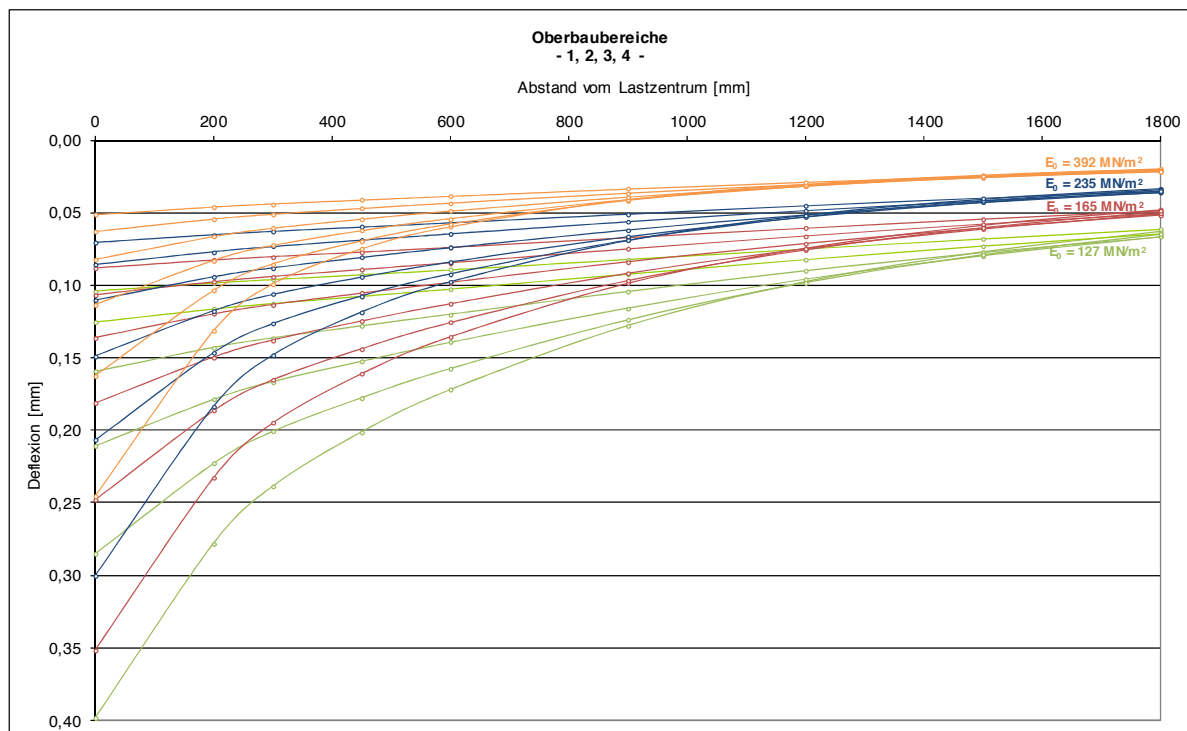
7.5.3.1.2 Oberbaubereiche für unterschiedliche Bettungsmoduln

Wie in Abschnitt 7.5.1 beschrieben, muss der Einfluss des Bettungsmoduls bei der Definition der Oberbaubereiche berücksichtigt werden. Es müssen aber nicht für alle 77 Bettungsmoduln des betrachtenden Bereiches eigene Oberbaubereiche definiert werden, da der Einfluss einer geringen Bettungsmodulveränderung auf die Oberbaubereiche minimal ist. Die Bettungsmoduln des betrachtenden Bereiches wurden daher in vier Bereiche zusammengefasst (Bettungsbereiche), vgl. Tabelle 7.4. Jeder Bettungsbereich wird durch einen festen Bettungsmodul, welcher dem Mittelwert des Bettungsbereiches entspricht, vertreten. Die festen Bettungsmoduln sind in Zeile „Fester Bettungsmodul“ dargestellt. Zusätzlich sind die zugehörigen Deflexionsbereiche, die Aufteilung der einzelnen Oberbaubereiche und das betrachtete Referenzsystem (Schichtaufbau) für jeden Bettungsbereich dargestellt.

Tabelle 7.4: Bettungsbereiche

Bettungsbereiche	1	2	3	4
Fester Bettungsmodul E ₀ [MN/m²]	127	165	235	392
Bettungsbereich E ₀ [MN/m²]	115 - 140	141 - 185	186 - 280	281 - 500
Deflexionsbereich am Gefonabstand 1800mm (D ₁₈₀₀) [mm]	0,069 - 0,057	0,056 - 0,043	0,042 - 0,029	0,028 - 0,016
Oberbaumodul der Oberbaubereiche [MN/m²]	1	1.000 - 2.000		
	2	2.000 - 4.000		
	3	4.000 - 8.000		
	4	8.000 - 15.000		
	5	15.000 - 25.000		
Schichtaufbau / Referenzsystem	Tragfähigkeitsklasse A			

Für jeden der vier Bettungsbereiche wurden die entsprechenden Oberbaubereiche berechnet, vgl. Diagramm 7.17.


Diagramm 7.17: Oberbaubereiche für die vier Bettungsbereiche

7.5.3.1.3 Oberbaubereiche für den zeichnerischen Ansatz

Die Bestimmung der Oberbaubereiche erfolgt über die in Abschnitt 7.5.3.1.2 definierten vier Bettungsbereiche. Für jeden der vier Bettungsbereiche ist eine eigene Ober-

baubereichstafel in Diagramm 7.18 bis Diagramm 7.21 dargestellt. In Anlage 2 sind die Deflexionen für die Oberbaubereiche tabellarisch dargestellt.

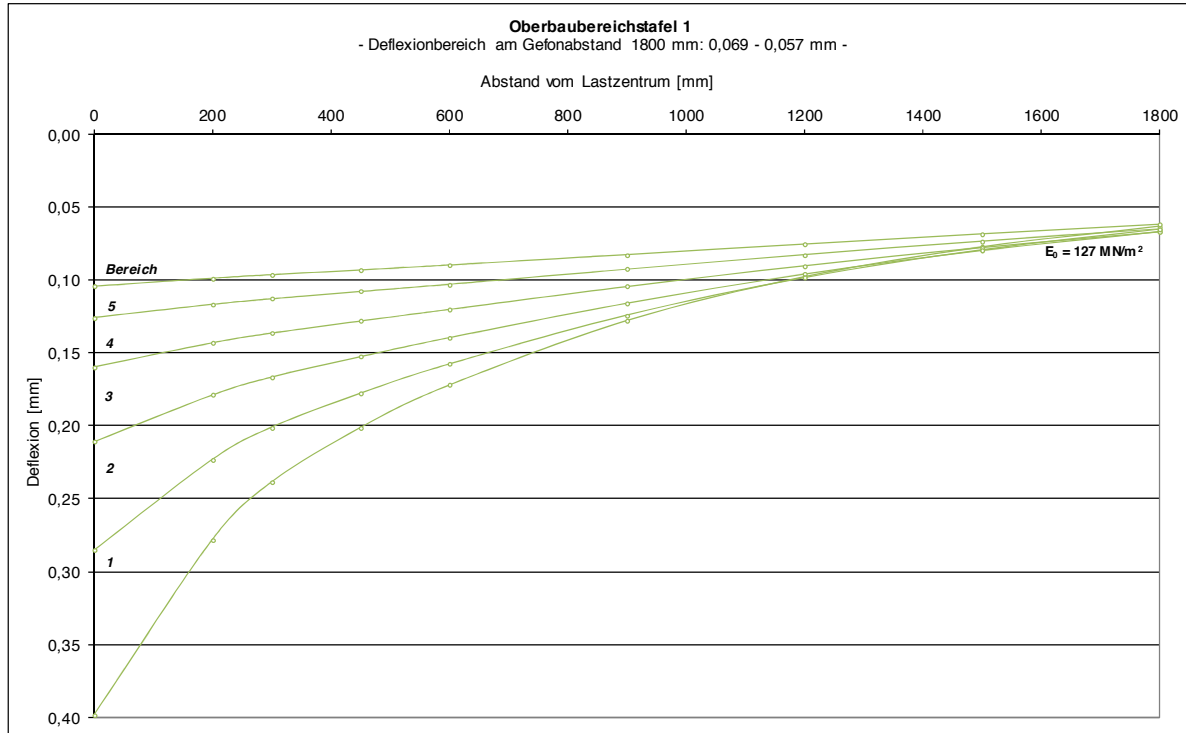


Diagramm 7.18: Oberbaubereichstafel 1

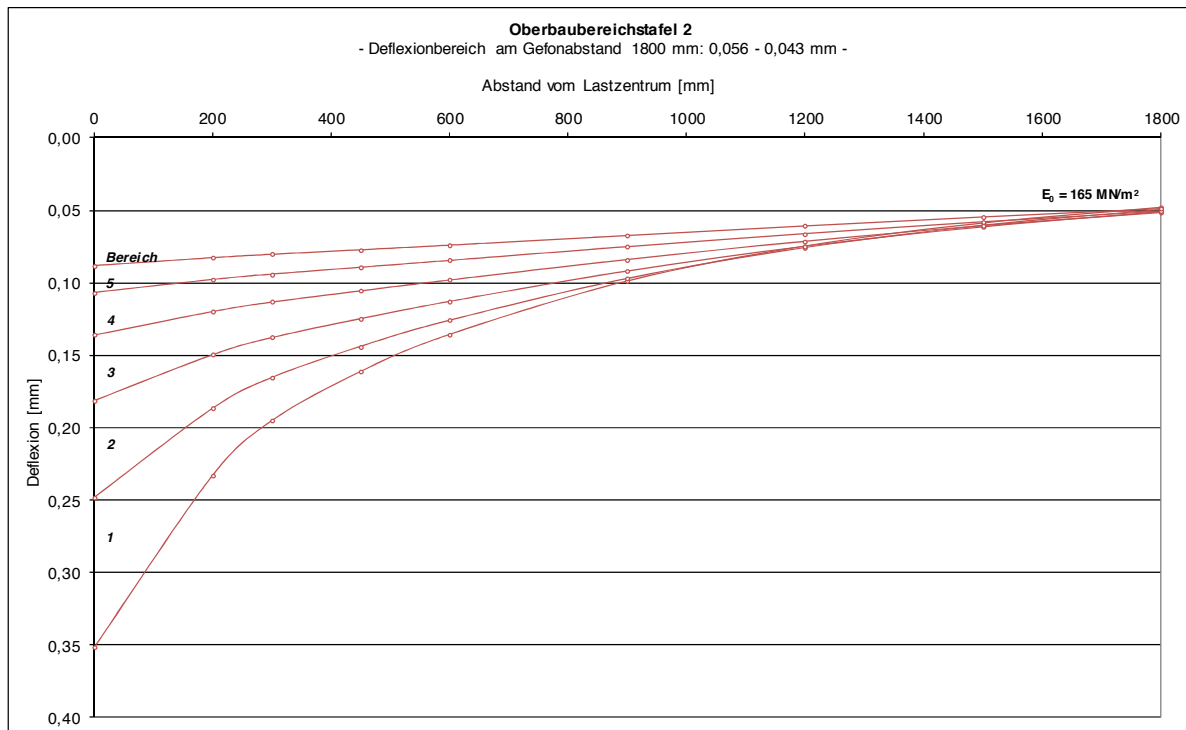


Diagramm 7.19: Oberbaubereichstafel 2

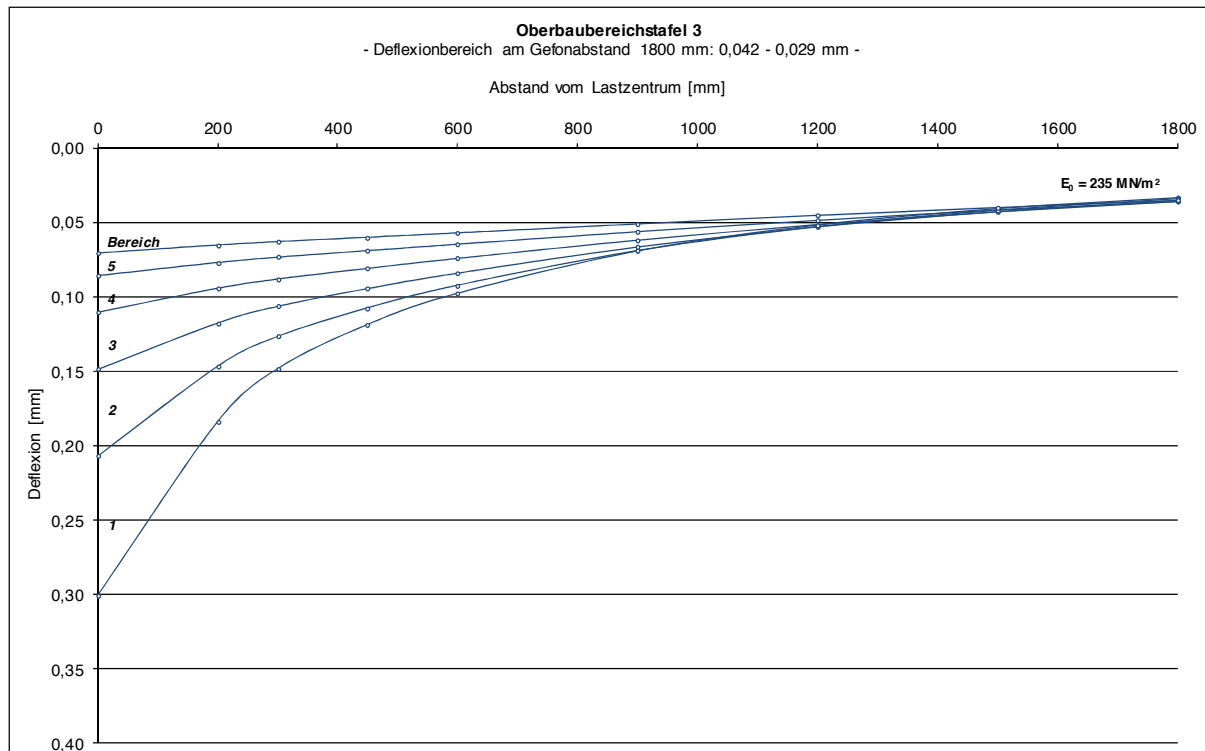


Diagramm 7.20: Oberbaubereichstafel 3

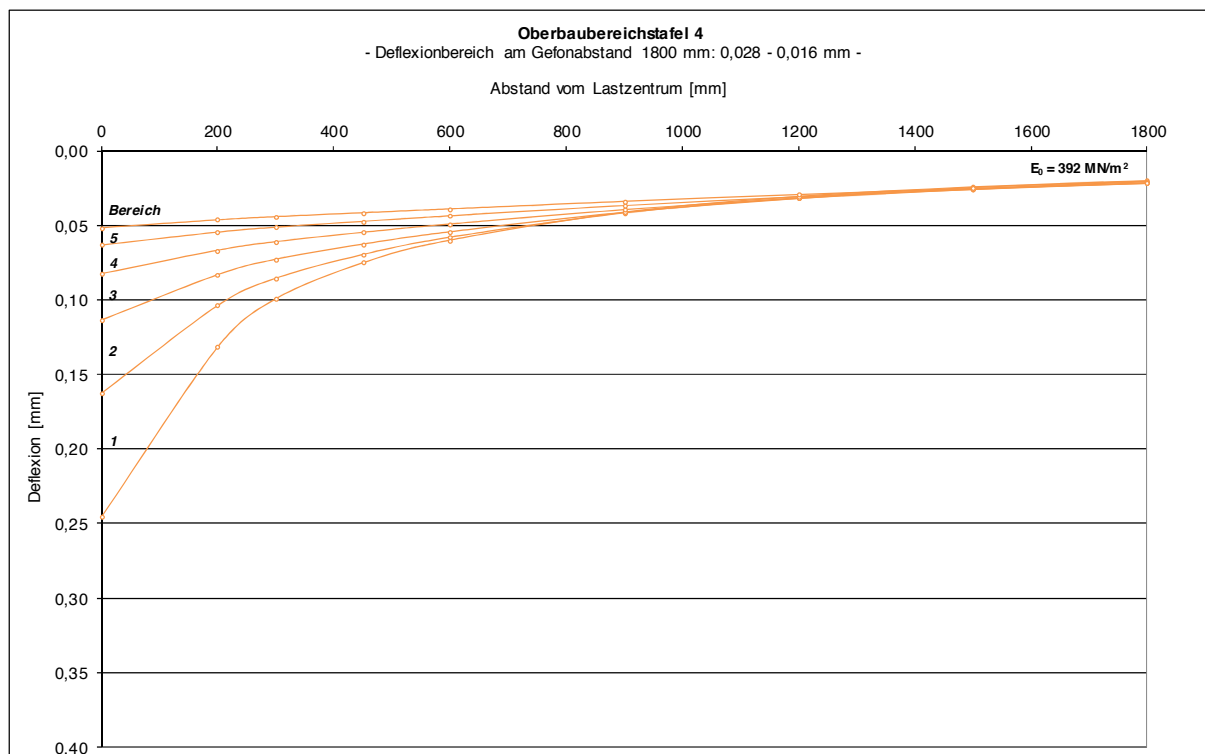


Diagramm 7.21: Oberbaubereichstafel 4

Die Auswahl der passenden Oberbaubereichstafel erfolgt über die Deflexion D_{1800} . Mit Hilfe der Deflexion D_{1800} wird anhand von Tabelle 7.5 die passende Oberbaubereichstafel ausgewählt.

Tabelle 7.5: Einteilung der Oberbaubereichstafeln

Deflexion am Geofonabstand 1800mm (D_{1800}) [mm]	0,069-0,057	0,056-0,043	0,042-0,029	0,028-0,016
Oberbaubereichstafel	1	2	3	4

Die Ermittlung des Oberbaubereichs erfolgt, wie in Abschnitt 7.5.3.1.1 beschrieben, über das Einzeichnen der gemessenen Deflexionsmulde in die passende Oberbaubereichstafel.

7.5.3.2 Ansatz mit der rechnerischen Oberbaubereichseinteilung (Rechnerischer Ansatz)

Neben dem in Abschnitt 7.5.3.1 vorgestellten zeichnerischen Ansatz wird nachfolgend ein rechnerischer Ansatz zur Bestimmung des Oberbaubereichs vorgestellt. Der rechnerische Lösungsansatz ermöglicht eine einfache und EDV unterstützte Bestimmung des Oberbaubereichs.

Der in Abschnitt 7.5.3.1 beschriebene Ansatz zur Bestimmung des Oberbaubereichs erfolgt durch die Betrachtung des vorderen Bereiches der Deflexionsmulde. Der vordere Bereich der Deflexionsmulde ist als der Bereich vom Lastzentrum bis zum Abstand von 1500 mm vom Lastzentrum entfernt definiert. Das Abfallen der Deflexionsmulde zum Lastzentrum kann aus der Differenz der Deflexion D_{1500} und D_0 berechnet werden, vgl. (2.17). Die berechnete Differenz wird im Rahmen dieser Arbeit als Deflexionsdifferenz D_{diff} bezeichnet.

$$D_{diff} = D_0 - D_{1500} \text{ [mm]} \quad (7.3)$$

mit:

D_{diff} [mm] Differenz zwischen D_0 und D_{1500} (Deflexionsdifferenz)

D_0 [mm] Deflexion im Lastzentrum

D_{1500} [mm] Deflexion am Geofon mit einem Abstand von 1500 mm zum Lastzentrum

Die Deflexionsdifferenz wird zur rechnerischen Bestimmung des Oberbaubereichs genutzt. Für jede der vier aufgestellten Oberbaubereichstafeln wurde eine Oberbaubereichstabelle erstellt, vgl. Tabelle 7.6. Die Deflexionsdifferenz wurde für die obere und untere Grenze jedes Oberbaubereiches berechnet. Aus der Deflexionsdifferenz der oberen und unteren Grenze wurde jeweils ein Bereich der Deflexionsdifferenz für jeden Oberbaubereich gebildet. Die berechnete Deflexionsdifferenz einer gemessenen

nen Deflexionsmulde kann einem Bereich der Deflexionsdifferenz zugeordnet werden. Somit kann der Oberbaubereich bestimmt werden, vgl. Tabelle 7.6.

Tabelle 7.6: Oberbaubereichstabellen

Oberbaubereichstabelle 1								
Deflexion [mm] am Geofonabstand 1800mm: $\geq 0,057$ mm								
Oberbau- bereich	untere Grenze			obere Grenze			Bereich der Deflexionsdifferenz	
	D_0	D_{1500}	D_{diff}	D_0	D_{1500}	D_{diff}	von	bis
1	0,39850	0,07700	0,32150	0,28530	0,07901	0,20629	0,20629	0,32150
2	0,28530	0,07901	0,20629	0,21090	0,07956	0,13134	0,13134	0,20629
3	0,21090	0,07956	0,13134	0,15950	0,07745	0,08205	0,08205	0,13134
4	0,15950	0,07745	0,08205	0,12550	0,07306	0,05244	0,05244	0,08205
5	0,12550	0,07306	0,05244	0,10400	0,06809	0,03591	0,03591	0,05244
Oberbaubereichstabelle 2								
Deflexion [mm] am Geofonabstand 1800mm: 0,056-0,043 mm								
Oberbau- bereich	untere Grenze			obere Grenze			Bereich der Deflexionsdifferenz	
	D_0	D_{1500}	D_{diff}	D_0	D_{1500}	D_{diff}	von	bis
1	0,35180	0,05864	0,29316	0,24810	0,05864	0,18946	0,18946	0,29316
2	0,24810	0,05864	0,18946	0,18130	0,06128	0,12002	0,12002	0,18946
3	0,18130	0,06128	0,12002	0,13610	0,06049	0,07561	0,07561	0,12002
4	0,13610	0,06049	0,07561	0,10660	0,05784	0,04876	0,04876	0,07561
5	0,10660	0,05784	0,04876	0,08809	0,05447	0,03362	0,03362	0,04876
Oberbaubereichstabelle 3								
Deflexion [mm] am Geofonabstand 1800mm: 0,042-0,029 mm								
Oberbau- bereich	untere Grenze			obere Grenze			Bereich der Deflexionsdifferenz	
	D_0	D_{1500}	D_{diff}	D_0	D_{1500}	D_{diff}	von	bis
1	0,30050	0,04066	0,25984	0,20700	0,04175	0,16525	0,16525	0,25984
2	0,20700	0,04175	0,16525	0,14880	0,04278	0,10602	0,10602	0,16525
3	0,14880	0,04278	0,10602	0,11030	0,04295	0,06735	0,06735	0,10602
4	0,11030	0,04295	0,06735	0,08574	0,04182	0,04392	0,04392	0,06735
5	0,08574	0,04182	0,04392	0,07053	0,03996	0,03057	0,03057	0,04392
Oberbaubereichstabelle 4								
Deflexion [mm] am Geofonabstand 1800mm: $\leq 0,028$ mm								
Oberbau- bereich	untere Grenze			obere Grenze			Bereich der Deflexionsdifferenz	
	D_0	D_{1500}	D_{diff}	D_0	D_{1500}	D_{diff}	von	bis
1	0,24570	0,02405	0,22165	0,16260	0,02452	0,13808	0,13808	0,22165
2	0,16260	0,02452	0,13808	0,11340	0,02521	0,08819	0,08819	0,13808
3	0,11340	0,02521	0,08819	0,08227	0,02574	0,05653	0,05653	0,08819
4	0,08227	0,02574	0,05653	0,06304	0,02568	0,03736	0,03736	0,05653
5	0,06304	0,02568	0,03736	0,05142	0,02507	0,02635	0,02635	0,03736

7.6 Verschiebungsfaktoren

Für die Oberbaubereiche 1-5 müssen die Verschiebungsfaktoren berechnet werden. Für jeden Oberbaubereich wird eine Tafel mit Verschiebungsfaktoren erstellt, die eine Verschiebung aller gemessenen Deflexionsmulden, die den Oberbaubereich zugeordnet werden, ermöglichen. Es werden keine exakten Verschiebungsfaktoren für alle möglichen Oberbaumoduln bestimmt, sondern Verschiebungsfaktoren die für den gesamten Oberbaubereich gültig sind.

7.6.1 Tafeln mit Verschiebungsfaktoren

Die Verschiebungsfaktoren eines Oberbaubereichs müssen eine möglichst genaue Verschiebung aller gemessenen Deflexionsmulden, welche dem Oberbaubereich zugeordnet werden, ermöglichen. Nachfolgend werden zwei Lösungsansätze zur Erstellung der Verschiebungsfaktoren untersucht.

Lösungsansatz 1:

Die Verschiebungsfaktoren werden für eine Deflexionsmulde, die genau in der Mitte zwischen oberer und unterer Grenze liegt (rote Deflexionsmulde), berechnet, vgl. Diagramm 7.22.

Lösungsansatz 2:

Die Verschiebungsfaktoren werden durch die Mittelwertbildung der berechneten Verschiebungsfaktoren der oberen und unteren Grenze eines Oberbaubereiches ermittelt, vgl. Diagramm 7.22. Z.B. werden für den Oberbaubereich von 3.000 – 6.000 MN/m² die Verschiebungsfaktoren für eine Deflexionsmulde mit einem Oberbaumodul von 3000 MN/m² und 6000 MN/m² berechnet und anschließend der Mittelwert aus den Verschiebungsfaktoren gebildet.

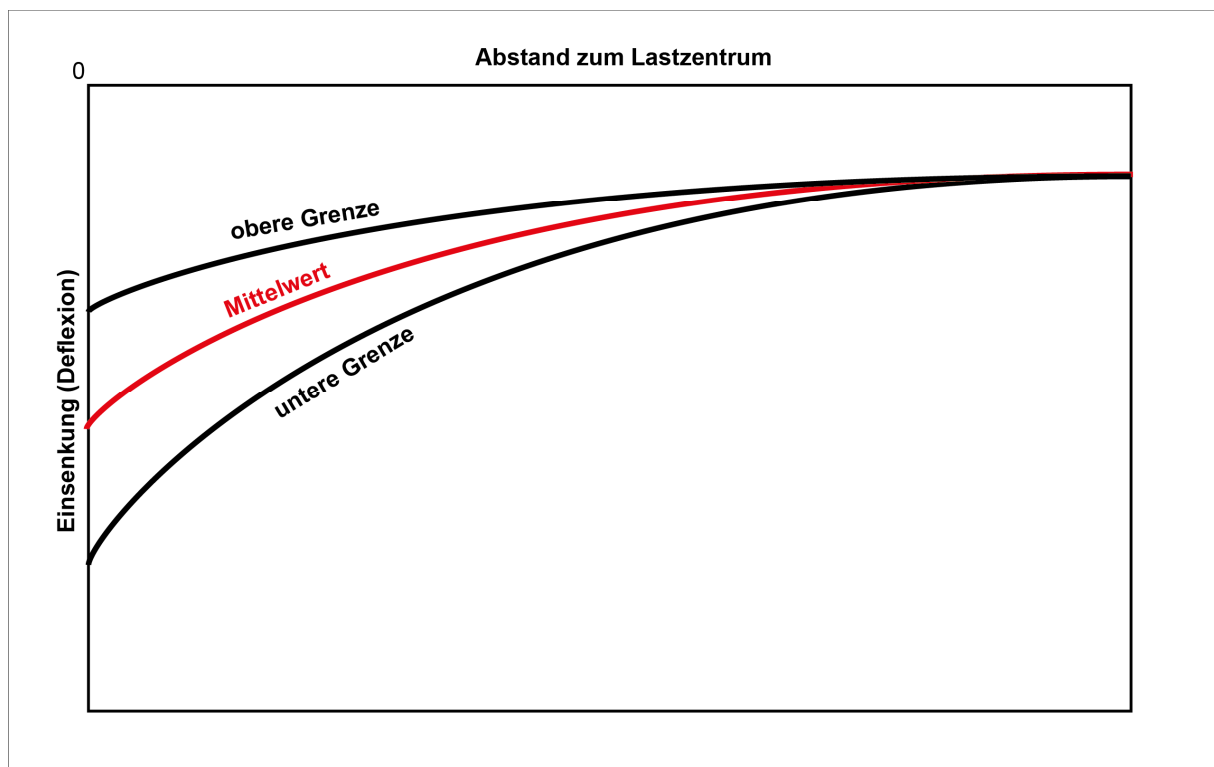


Diagramm 7.22: Mittelwertbildung der Verschiebungsfaktoren

In Diagramm 7.23 und Diagramm 7.24 ist die Entwicklung von Verschiebungsfaktoren für zwei Abstände zum Lastzentrum (0 mm und 1800 mm), aufgrund unterschied-

licher Oberbaumoduln dargestellt. Für die Darstellung wurde exemplarisch ein Oberbaubereich von 3.000 - 6.000 MN/m² gewählt.

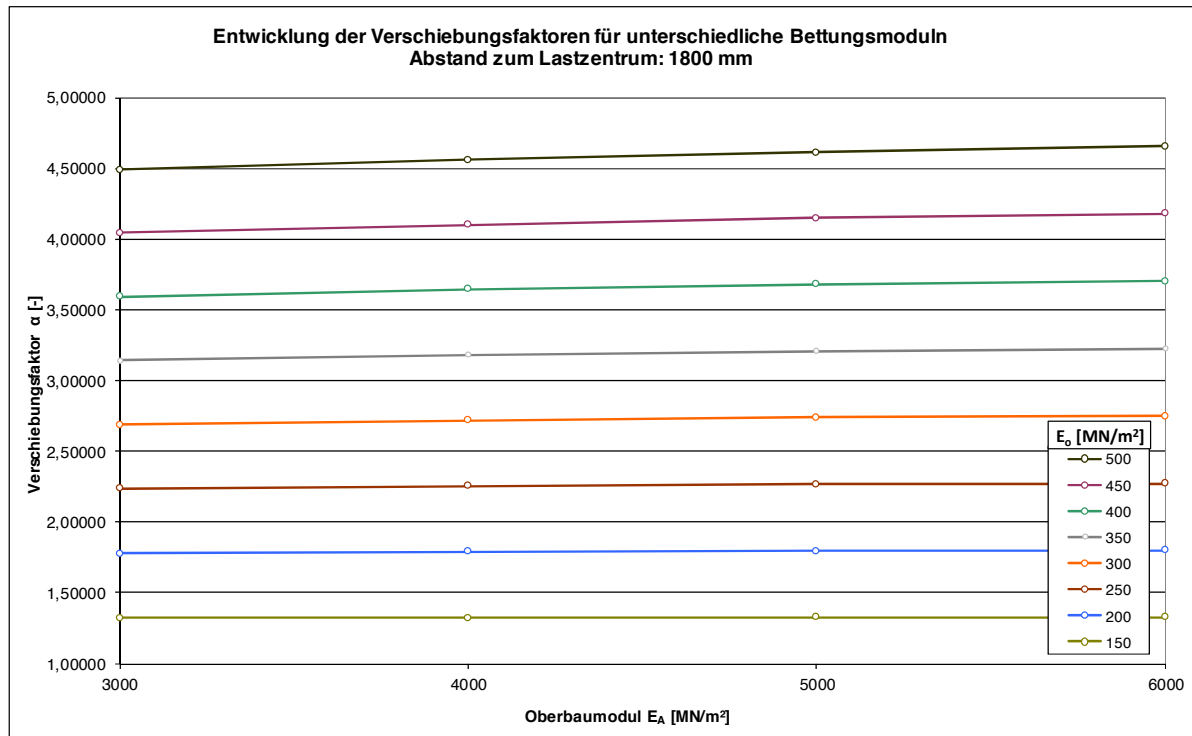


Diagramm 7.23: Entwicklung der Verschiebungsfaktoren (Abstand: 1800 mm)

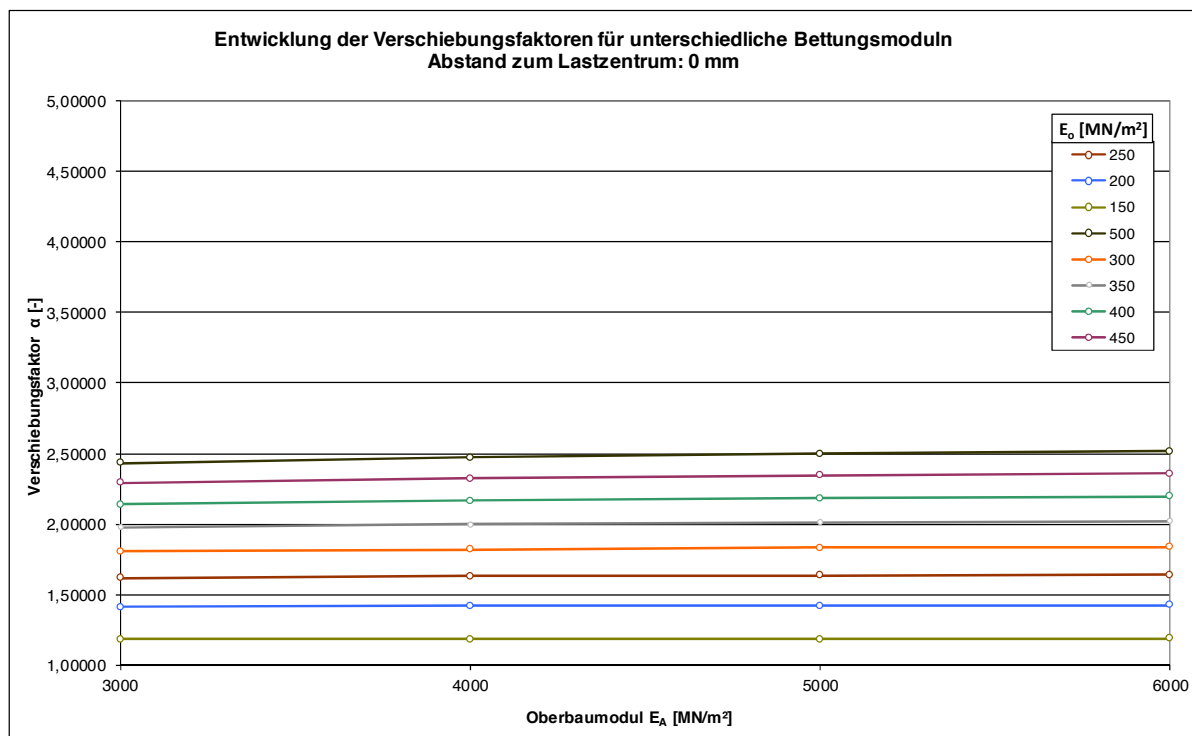


Diagramm 7.24: Entwicklung der Verschiebungsfaktoren (Abstand: 0 mm)

Den Diagrammen kann entnommen werden, dass die Verschiebungsfaktoren mit zunehmendem Oberbaumodul größer werden. Es gibt somit keine exakten Verschie-

bungsfaktoren für alle möglichen Oberbaumoduln eines Oberbaubereichs. Durch die Erstellung von Verschiebungsfaktoren für den gesamten Oberbaubereich entstehen Abweichungen gegenüber den exakten Verschiebungsfaktoren eines Oberbaumoduls. Für die Erstellung der Verschiebungsfaktoren mit Hilfe der Lösungsansätze 1 und 2 wurden die Abweichungen für die fünf zuvor aufgestellten Oberbaubereiche und unterschiedliche Bettungsmoduln berechnet. Die berechneten Abweichungen der Verschiebungsfaktoren sind für die Oberbaubereiche 1 und 5 in Tabelle 7.7 dargestellt. Die Abweichungen für die Oberbaubereiche 1 - 5 sind in Anlage 1 dargestellt.

Tabelle 7.7: Abweichung der Verschiebungsfaktoren - Oberbaubereiche

Oberbau- bereich	Bettungs- modul E_0 [MN/m²]	Abweichung			
		Lösungsansatz 1		Lösungsansatz 2	
		[-]	[%]	[-]	[%]
1	Abstand vom Lastzentrum = 1.800 cm				
	150	0,00141	0,11%	0,00139	0,11%
	200	0,00612	0,34%	0,00604	0,34%
	250	0,01285	0,57%	0,01272	0,57%
	300	0,02060	0,76%	0,02043	0,76%
	350	0,02946	0,93%	0,02927	0,93%
	400	0,03762	1,04%	0,03740	1,03%
	450	0,04768	1,17%	0,04747	1,16%
	500	0,05664	1,25%	0,05644	1,24%
	Abstand vom Lastzentrum = 0 cm				
	150	0,00972	0,85%	0,00831	0,72%
	200	0,02533	1,93%	0,02149	1,63%
	250	0,04194	2,88%	0,03535	2,41%
	300	0,05886	3,73%	0,04934	3,11%
	350	0,07544	4,48%	0,06293	3,71%
	400	0,09189	5,17%	0,07631	4,26%
	450	0,10813	5,82%	0,08944	4,76%
	500	0,12426	6,43%	0,10239	5,24%
5	Abstand vom Lastzentrum = 1.800 cm				
	150	0,00717	0,56%	0,00702	0,55%
	200	0,01984	1,19%	0,01955	1,18%
	250	0,03435	1,67%	0,03400	1,65%
	300	0,04995	2,04%	0,04962	2,02%
	350	0,06668	2,34%	0,06645	2,33%
	400	0,08427	2,59%	0,08419	2,59%
	450	0,10197	2,79%	0,10208	2,79%
	500	0,12079	2,97%	0,12115	2,98%
	Abstand vom Lastzentrum = 0 cm				
	150	0,00158	0,13%	0,00144	0,12%
	200	0,00455	0,32%	0,00415	0,29%
	250	0,00810	0,50%	0,00738	0,45%
	300	0,01196	0,66%	0,01088	0,60%
	350	0,01607	0,81%	0,01461	0,73%
	400	0,02023	0,94%	0,01836	0,85%
	450	0,02492	1,07%	0,02259	0,97%
	500	0,02949	1,20%	0,02671	1,08%

Die Abweichungen der Verschiebungsfaktoren liegen zwischen 0,11% und 6,43%. Die Abweichungen nehmen mit zunehmendem Bettungsmodul und kleiner werdendem Oberbaubereich zu. Die größten Abweichungen entstehen für den Oberbaubereich 1 und einem Abstand zum Lastzentrum von 0 cm. Die Abweichungen sind für Lösungsansatz 1 größer als die Abweichungen für Lösungsansatz 2. Die maximalen Abweichungen von 5,24% für Lösungsansatz 2 ermöglichen eine ausreichend genaue Verschiebung der gemessenen Deflexionsmulden. Die Berechnung der Verschiebungsfaktoren erfolgt daher für alle Oberbaubereiche mit Hilfe des Lösungsansatzes 2.

Die Tafeln mit den berechneten Verschiebungsfaktoren für die Oberbaubereiche 1 - 5 sind in Anlage 3 dargestellt.

7.6.2 Berechnung der Verschiebungsfaktoren

Die Verschiebungsfaktoren lassen eine Abhängigkeit vom Oberbau- und Bettungsmodul erkennen. In Diagramm 7.25 ist der Verlauf der Verschiebungsfaktoren in Abhängigkeit vom Bettungsmodul für das Lastzentrum dargestellt. Der Verlauf der Verschiebungsfaktoren lässt sich für alle Oberbaubereiche mit einer polynomischen Regression 2. Grades nachbilden. Das Bestimmtheitsmaß liegt für alle Oberbaubereiche bei $R^2 \geq 0,99$.

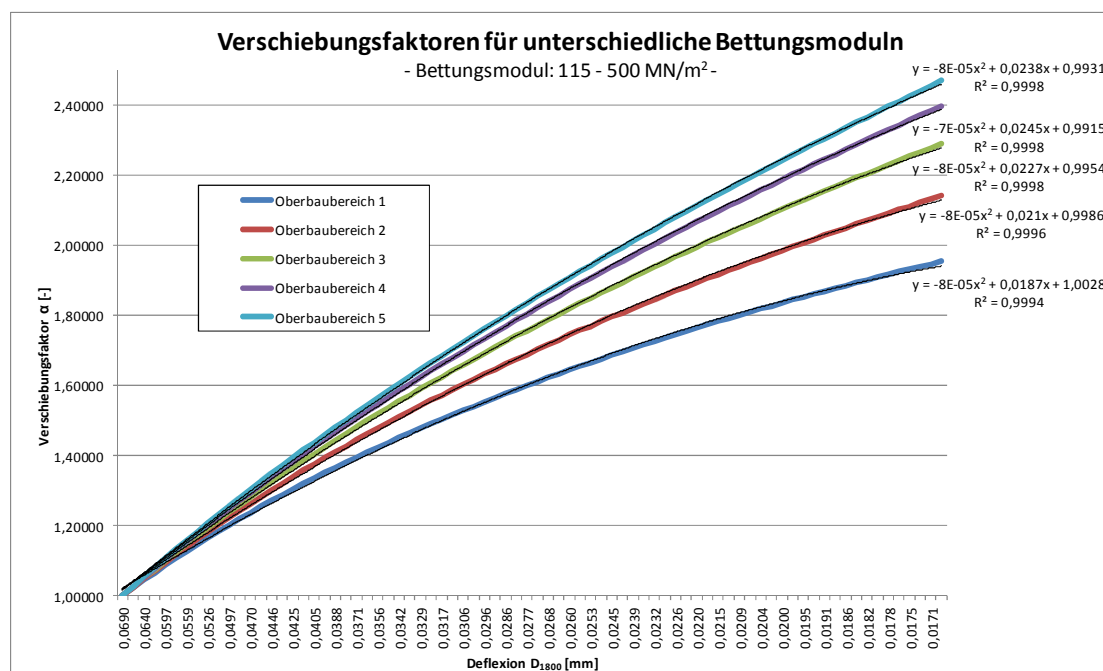


Diagramm 7.25: Verschiebungsfaktoren der Oberbaubereiche für unterschiedliche Bettungsmodul im Lastzentrum

In Diagramm 7.26 ist der Verlauf der Verschiebungsfaktoren in Abhängigkeit vom Oberbaumodul für fünf Bettungsmoduln im Lastzentrum dargestellt. Der Verlauf der Verschiebungsfaktoren lässt sich für alle Bettungsmoduln mit einer Polynomischen Regression 2. Grades nachbilden. Das Bestimmtheitsmaß liegt für alle Bettungsmoduln bei $R^2 \geq 0,99$.

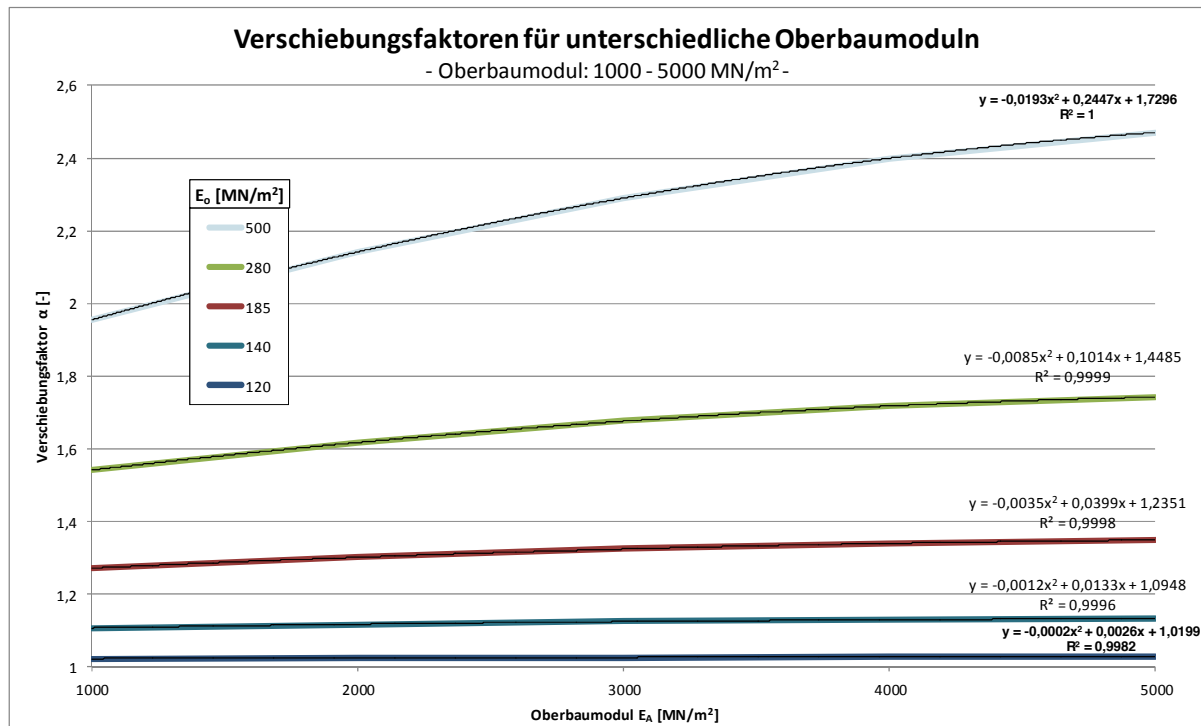


Diagramm 7.26: Verschiebungsfaktoren in Abhängigkeit vom Oberbaumodul für fünf Bettungsmoduln im Lastzentrum

Die dargestellten Abhängigkeiten der Verschiebungsfaktoren von Oberbau- und Bettungsmodul ermöglicht die Berechnung der Verschiebungsfaktoren. Die Berechnung der Verschiebungsfaktoren hat den Vorteil, dass Zwischenwerte berechnet werden können und eine EDV-unterstützte Untergrundkorrektur vereinfacht wird.

Mit MATLAB [56] wurden 3D-Diagramme der Verschiebungsfaktoren (z-Achse) in Abhängigkeit vom Oberbaumodul (x-Achse) und Bettungsmodul (y-Achse) erstellt. In Diagramm 7.27 ist das 3D-Diagramm für die Verschiebungsfaktoren im Lastzentrum dargestellt. Die 3D-Diagramme aller Geofonabstände zum Lastzentrum sind in Anlage 5 dargestellt.

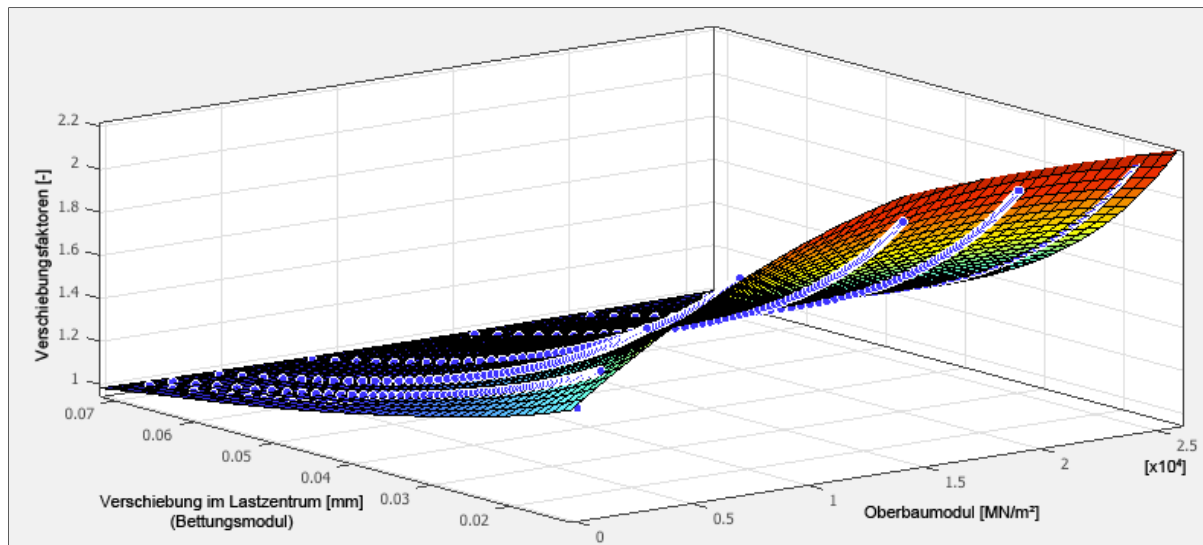


Diagramm 7.27: Verschiebungsfaktoren für unterschiedliche Oberbau- und Bettungsmoduln im Lastzentrum, 3D-Diagramm

Die Diagramme enthalten zusätzlich eine mit MATLAB [56] erstellte Fläche. Die Fläche wurde mit Hilfe einer Regressionsanalyse (Curve Fitting) erstellt. Um eine ausreichend genaue Anpassung der Fläche an die Daten zu erzielen, wurde die Regression mit einem Polynom 2. Grades in x-Richtung (Asphaltschicht E-Modul) und einem Polynom 5. Grades in y-Richtung (Untergrund E-Modul) durchgeführt. Das Bestimmtheitsmaß liegt für alle Geofonabstände bei $R^2 \geq 0,9889$.

Das in y-Richtung genutzte Polynom 5. Grades kann zu Abweichungen bei der Berechnung der Verschiebungsfaktoren führen. Die Regression mit einem Polynom hohen Grades kann die zur Berechnung der Kurve genutzten Datenpunkte sehr genau abbilden, aber möglicherweise Zwischenwerte nicht ausreichend genau abbilden. Da die in Anlage 5 dargestellten 3D Diagramme ausschließlich glatte Kurven enthalten und in y-Richtung (Polynom 5. Grades) eine hohe Datenpunktdichte genutzt wurde, sind diese Abweichungen zwischen den Datenpunkten nicht zu erwarten.

Die Ergebnisse der Regression sind in Tabelle 7.8 dargestellt. Die Tabelle enthält die Formel zur Berechnung der Verschiebungsfaktoren. Für jeden Abstand zum Lastzentrum enthält die Tabelle eigene Koeffizienten, welche in die Formel eingesetzt werden. Zur Berechnung der Verschiebungsfaktoren werden der Oberbaumodul E_A und die Deflexion D_{1800} benötigt.

In Tabelle 7.8 ist zusätzlich die Genauigkeit der berechneten Verschiebungsfaktoren dargestellt. Für jeden Abstand zum Lastzentrum ist das Bestimmtheitsmaß angegeben. Zusätzlich wurden die Abweichungen zwischen den mit der Formel berechneten Verschiebungsfaktoren und den genauen Verschiebungsfaktoren bestimmt. Für je-

den Abstand zum Lastzentrum sind die minimalen, maximalen und die mittleren Abweichungen dargestellt. Es wird deutlich, dass die Berechnung der Verschiebungsfaktoren ausreichend genau ist.

Tabelle 7.8: Berechnung der Verschiebungsfaktoren, Formel

$F_{\text{Geofon}} = p00 + p10 \cdot E_A + p01 \cdot U_E + p20 \cdot E_A^2 + p11 \cdot E_A \cdot U_E + p02 \cdot U_E^2 + p21 \cdot E_A^2 \cdot U_E + p12 \cdot E_A \cdot U_E^2 + p03 \cdot U_E^3 + p22 \cdot E_A^2 \cdot U_E^2 + p13 \cdot E_A \cdot U_E^3 + p04 \cdot U_E^4 + p23 \cdot E_A^2 \cdot U_E^3 + p14 \cdot E_A \cdot U_E^4 + p05 \cdot U_E^5$									
F_{Geofon} : Verschiebungsfaktor am Abstand zum Lastzentrum [-] p00...p05: Koeffizienten E_A : Oberbaumodul [-] U_E : Deflexion am Abstand zum Lastzentrum 1800mm [mm]									
	Abstand zum Lastzentrum (Geofon)								
	0	200	300	450	600	900	1200	1500	1800
Koeffizienten									
p00	3,251	5,868	7,640	9,483	10,850	12,680	13,580	13,820	13,710
p10	0,00017430	0,00002731	-0,00009958	-0,00021970	-0,00028900	-0,00032520	-0,00026570	-0,00015580	-0,00003887
p01	-147,3	-348,8	-493,5	-647,5	-763	-919,4	-1001	-1030	-1031
p20	-4,160E-09	-8,541E-10	2,247E-09	5,112E-09	6,618E-09	6,899E-09	4,764E-09	1,569E-09	1,457E-09
p11	-0,010230	-0,002087	0,005893	0,01367	0,01813	0,02027	0,01624	0,009165	0,001815
p02	5410	12460	17580	23160	27410	33370	36790	38380	38950
p21	2,151E-07	5,829E-08	-1,150E-07	-2,793E-07	-3,638E-07	-3,701E-07	-2,380E-07	-5,317E-08	-1,135E-07
p12	0,23770	0,05367	-0,13880	-0,33050	-0,44180	-0,49790	-0,40370	-0,23540	-0,05927
p03	-115300	-246800	-341100	-445700	-527100	-645600	-720400	-762200	-783800
p22	-0,000003970	-0,000001262	0,000002097	0,000005343	0,000006990	0,000006993	0,000004279	0,000000630	0,000002554
p13	-2,4600	-0,5436	1,4710	3,5150	4,7380	5,4590	4,6110	2,9410	1,1120
p04	1259000	2515000	3398000	4391000	5178000	6370000	7181000	7690000	8003000
p23	0,00002519	0,00000873	-0,00001317	-0,00003458	-0,00004537	-0,00004493	-0,00002669	-0,00000272	-0,00001778
p14	9,125	1,726	-5,684	-13,360	-18,190	-21,820	-19,720	-14,220	-7,540
p05	-5431000	-10270000	-13590000	-17370000	-20430000	-25190000	-28630000	-30960000	-32530000
Genauigkeit									
Bestimmtheitsmaß R^2	0,9905	0,9995	0,9991	0,9962	0,9955	0,9974	0,9994	0,9997	0,9999
Abweichung min.	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Abweichung max.	7,5%	3,7%	3,4%	5,4%	5,9%	5,3%	3,8%	4,0%	6,6%
mittlere Abweichung	1,8%	0,8%	1,0%	1,7%	1,9%	1,7%	1,3%	1,3%	1,9%

Der zur Berechnung der Verschiebungsfaktoren benötigte Oberbaumodul wird mit Hilfe der berechneten Deflexionsdifferenz D_{diff} (Abschnitt 7.5.3.2) zur Bestimmung des Oberbaubereiches bestimmt. Die Entwicklung des Oberbaumoduls in Abhängigkeit von der Deflexionsdifferenz kann mit einer potentiellen Regression ($a \cdot x^b + c$) für jeden der in Abschnitt 7.5.3.1.1 definierten vier Bettungsbereiche beschrieben werden. Das Bestimmtheitsmaß der potentiellen Regression beträgt für alle Untergrundbereiche $R^2 = 0,9999$. In Diagramm 7.28 ist die potentielle Regression exemplarisch für einen Bettungsbereich dargestellt.

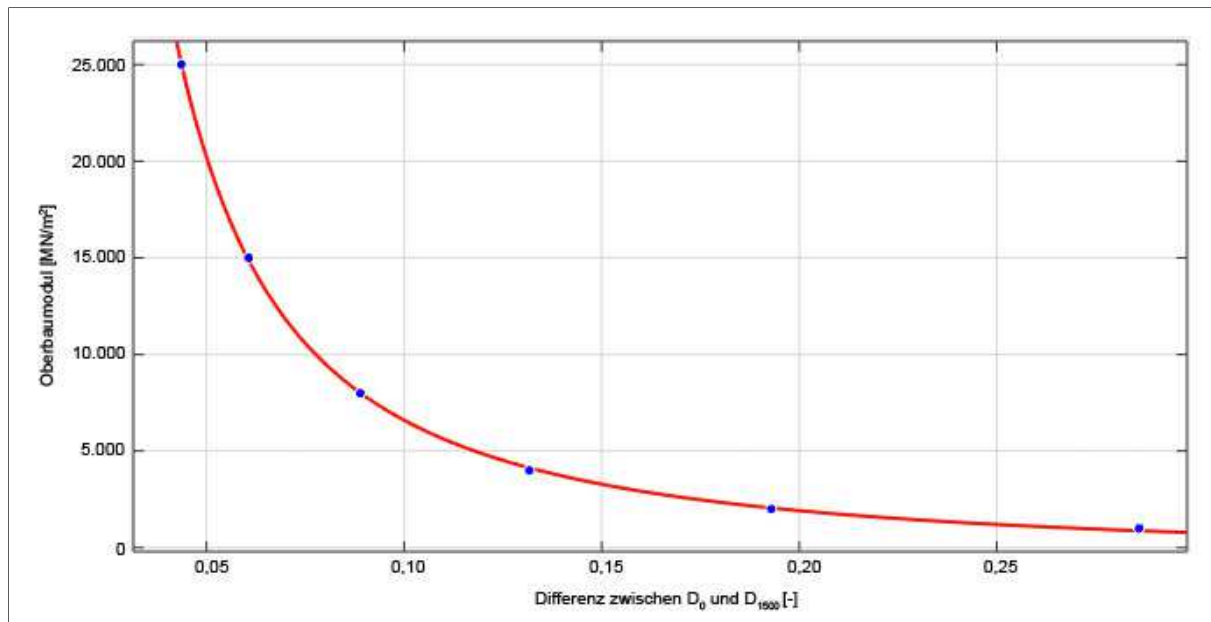


Diagramm 7.28: Bestimmung des Oberbaumoduls, Regression

Die mit Hilfe der potentiellen Regression hergeleiteten Formeln werden zur Berechnung des Oberbaumoduls genutzt. Es ist zu beachten, dass der berechnete Oberbaumodul im Rahmen dieser Arbeit lediglich zur Abschätzung des Oberbaumoduls dient, vgl. Abschnitt 7.5. Die genaue Berechnung des Oberbaumoduls wurde nicht angestrebt. Die Formeln zur Berechnung des Oberbaumoduls sind in Tabelle 7.9 dargestellt. Die Tabelle enthält für jede der vier aufgestellten Bettungsbereiche eine Formel zur Berechnung des Oberbaumoduls.

Tabelle 7.9: Berechnung des Oberbaumoduls, Formeln

Deflexion am Geofonabstand 1800mm (D_{1800}) [mm]	> 0,056	0,056-0,043	0,042-0,029	< 0,029
Formel Oberbaumodul $[MN/m^2]$	$E_A = 299,8 \cdot D_{diff}^{-1,335} - 435,2$	$E_A = 247,3 \cdot D_{diff}^{-1,365} - 385,4$	$E_A = 187,8 \cdot D_{diff}^{-1,407} - 329,6$	$E_A = 119,3 \cdot D_{diff}^{-1,472} - 172,8$
E_A : Oberbaumodul $[MN/m^2]$ D_{diff} : Differenz zwischen D_0 und D_{1500} (Einknickdifferenz) $D_{diff} = D_0 - D_{1500}$ [mm]				

7.7 Ablauf der Untergrundkorrektur

Es wurden zwei Varianten zur Bestimmung der Verschiebungsfaktoren vorgestellt. Variante 1 eignet sich zur schnellen Auswertung kleinerer Datenmengen ohne großen rechnerischen Aufwand und EDV Unterstützung. Die Auswertung größerer Datenmengen kann mit Variante 2 und EDV Unterstützung erfolgen.

Nachfolgend wird der Ablauf der Untergrundkorrektur vorgestellt. In Abbildung 7.1 ist der Ablauf der Untergrundkorrektur für beide Varianten dargestellt.



Abbildung 7.1: Ablauf der Untergrundkorrektur

Untergrundkorrektur nach Variante 1:

Mit Hilfe der Deflexion D_{1800} und Tabelle 7.5 wird der Bettungsbereich bestimmt. Der Bettungsbereich dient zur Auswahl der Oberbaubereichstafel (Diagramm 7.18 - Diagramm 7.21). Der Oberbaubereich 1-5 wird durch Einzeichnen der gemessenen Deflexionsmulde in die ausgewählte Oberbaubereichstafel bestimmt. Der Oberbaubereich kann alternativ durch die Berechnung der Deflexionsdifferenz D_{diff} und Tabelle 7.6 bestimmt werden.

Zur Ermittlung der Verschiebungsfaktoren ist in Anlage 2 für jeden Oberbaubereich eine Tafel mit Verschiebungsfaktoren dargestellt. Die Tafeln enthalten für jedes Geofon eine Zeile mit Verschiebungsfaktoren. Die passende Zeile wird anhand der Deflexion D_{1800} ausgewählt. Die gemessenen Deflexionen werden mit den Verschiebungsfaktoren multipliziert, um die untergrundkorrigierte Deflexionsmulde zu berechnen.

Untergrundkorrektur nach Variante 2:

Der Oberbaumodul E_A wird mit Hilfe der Formeln aus Tabelle 7.9 berechnet. Die passende Formel wird anhand der Deflexion D_{1800} aus Tabelle 7.9 ausgewählt.

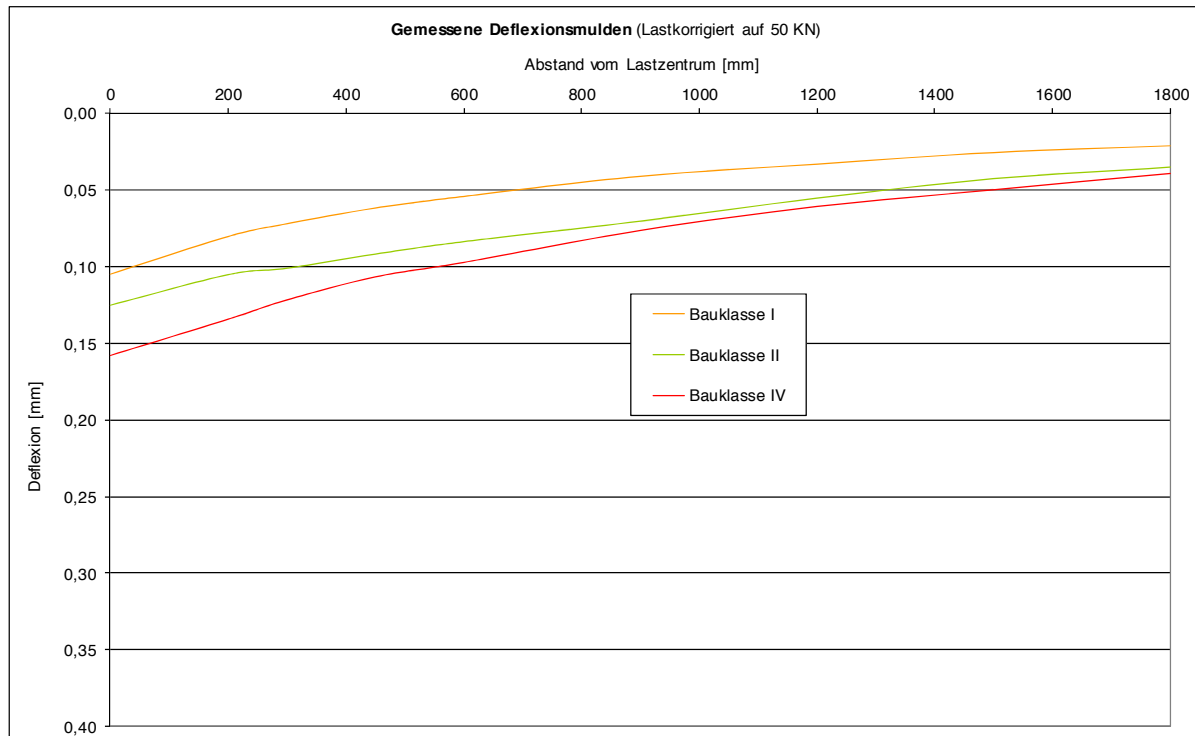
Die Verschiebungsfaktoren werden mit der Formel aus Tabelle 7.8, dem Oberbaumodul E_A und der Deflexion D_{1800} berechnet. Die Verschiebungsfaktoren werden für jedes Geofon einzeln berechnet. Die gemessenen Deflexionen werden mit den Verschiebungsfaktoren multipliziert, um die untergrundkorrigierte Deflexionsmulde zu berechnen.

7.8 Exemplarische Untergrundkorrektur

Der Ablauf und die Anwendbarkeit der Untergrundkorrektur werden nachfolgend für die in Tabelle 7.10 dargestellten mit dem FWD (vgl. Abschnitt 3 und Anlage 6 gemessenen Deflexionsmulden exemplarisch vorgestellt. In Tabelle 7.10 sind die vorhandenen Bauklassen nach RSTO 01 und die gemessenen Deflexionen für die einzelnen Abstände zum Lastzentrum dargestellt. Für die Temperaturkorrektur sind zusätzlich die während der Messung ermittelten Asphaltkörpertemperaturen in 5 cm Tiefe nach JANSEN [31] dargestellt. Der Verlauf der gemessenen Deflexionsmulden ist in Diagramm 7.29 dargestellt.

Tabelle 7.10: Gemessene Deflexionsmulden

Gemessene Deflexionsmulden (Lastkorrigiert auf 50kN)										
Bauklasse nach RStO 01	Abstand zum Lastzentrum [mm]									Asphaltkörpertemperatur in 5cm Tiefe
	0	200	300	450	600	900	1200	1500	1800	
I	0,10479	0,08022	0,07188	0,06165	0,05408	0,04095	0,03298	0,02544	0,02104	27
II	0,12506	0,10514	0,10096	0,09173	0,08360	0,07023	0,05522	0,04254	0,03502	10
IV	0,15785	0,13420	0,12161	0,10660	0,09715	0,07631	0,06068	0,04976	0,03905	12


Diagramm 7.29: Gemessene Deflexionsmulden

Die gemessene Deflexionsmulde wird vor der Untergrundkorrektur nach JANSEN [31] auf 20°C temperaturkorrigiert:

Temperaturkorrigierte Deflexionsmulden									
Bauklasse nach RStO 01	Abstand zum Lastzentrum [mm]								
	0	200	300	450	600	900	1200	1500	1800
I	0,09299	0,07231	0,06557	0,05754	0,05149	0,04095	0,03298	0,02544	0,02104
II	0,14350	0,11926	0,11492	0,10276	0,09054	0,07023	0,05522	0,04254	0,03502
IV	0,17631	0,14855	0,13519	0,11851	0,10372	0,07631	0,06068	0,04976	0,03905

Zeichnerische Untergrundkorrektur

1. Schritt: Bestimmung des Oberbaubereiches

Die Deflexion D_{1800} wird abgelesen.

I: 0,02104 mm

II: 0,03502 mm

IV: 0,03905 mm

Mit Hilfe der Deflexion D_{1800} und Tabelle 7.5 wurden die Oberbaubereichstafeln bestimmt.

I: Oberbaubereichstafel 4

II: Oberbaubereichstafel 3

IV: Oberbaubereichstafel 3

Zeichnerisch:

Der Oberbaubereich wird durch Einzeichnen der Deflexionsmulde in die Oberbaubereichstafel (Diagramm 7.30 - Diagramm 7.31) bestimmt.

I: Oberbaubereich 3 (vgl. Diagramm 7.30)

II: Oberbaubereich 3 (vgl. Diagramm 7.31)

IV: Oberbaubereich 2 (vgl. Diagramm 7.31)

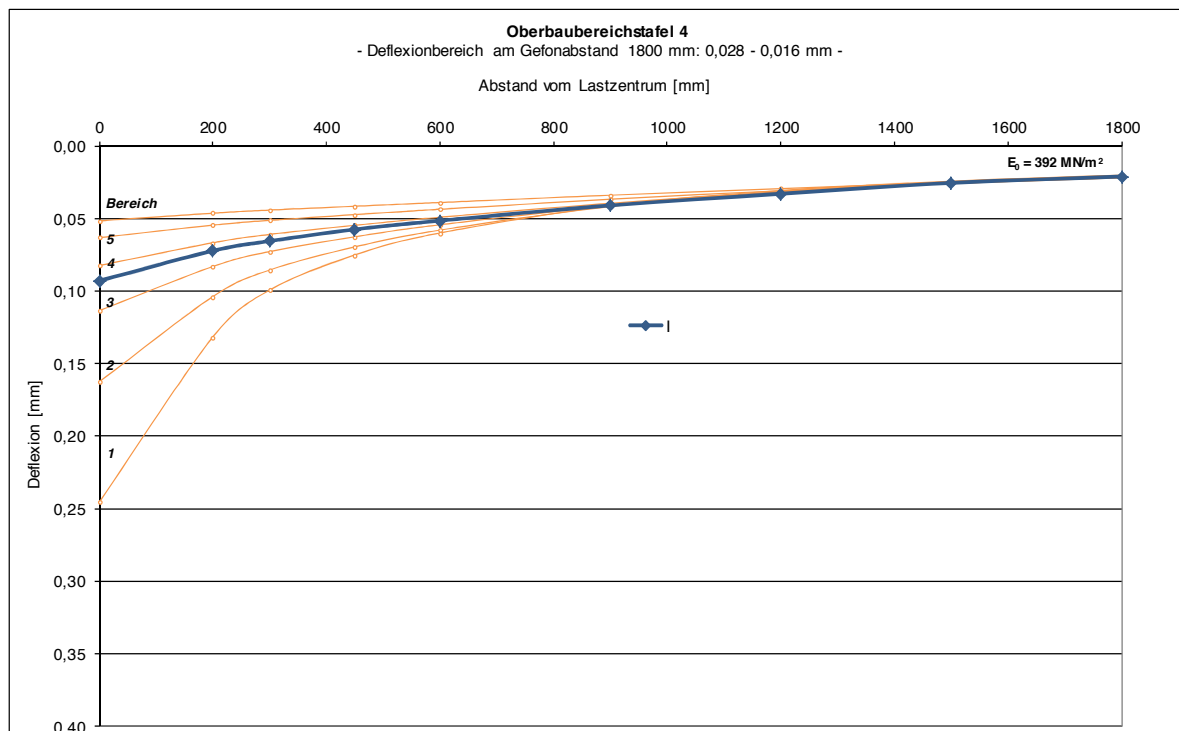


Diagramm 7.30: Bestimmung des Oberbaubereichs, Oberbaubereichstafel 4

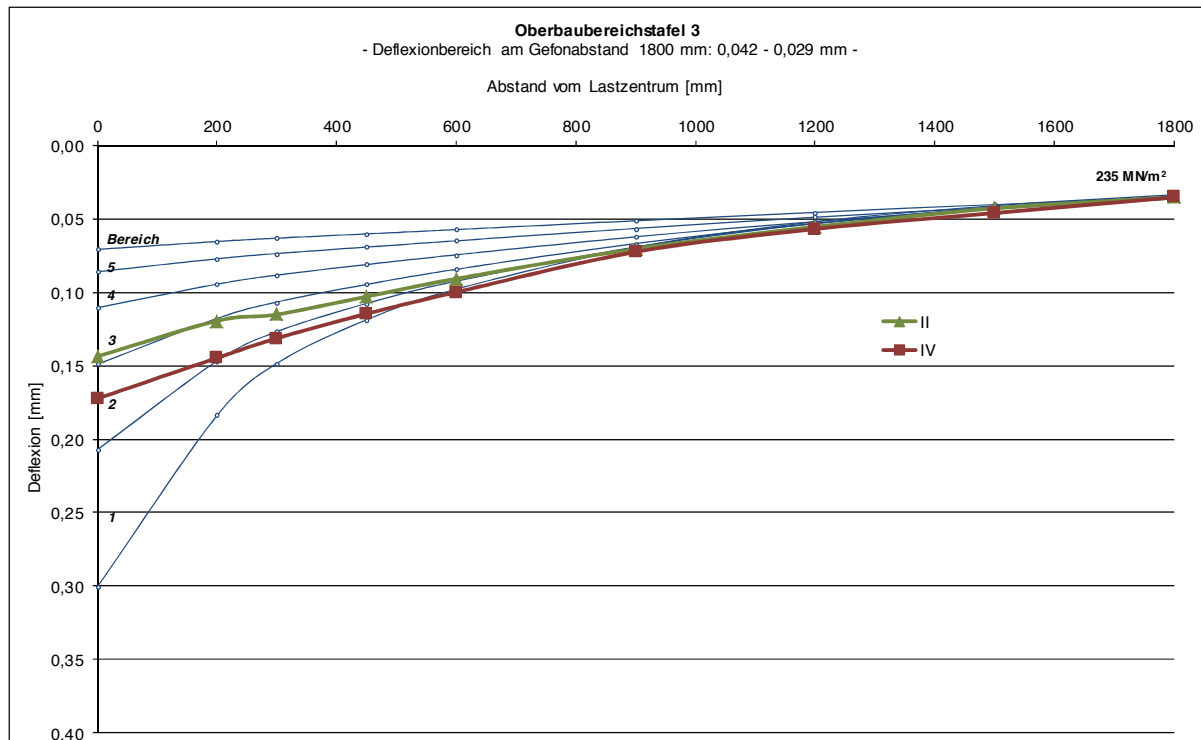


Diagramm 7.31: Bestimmung des Oberbaubereichs, Oberbaubereichstafel 3

Rechnerisch:

Alternativ kann der Oberbaubereich mit Hilfe der berechneten Deflexionsdifferenz ($D_{diff} = D_0 - D_{1500}$) und Tabelle 7.6 bestimmt werden.

$$\text{I: } D_{diff} = 0,09299 - 0,02544 = 0,06755$$

=> Oberbaubereich 3

$$\text{II: } D_{diff} = 0,14350 - 0,04254 = 0,10097$$

=> Oberbaubereich 3

$$\text{IV: } D_{diff} = 0,17631 - 0,04976 = 0,12654$$

=> Oberbaubereich 2

2.Schritt: Bestimmung der Verschiebungsfaktoren

Die Tafel mit Verschiebungsfaktoren wird aus Anlage 3 für den zuvor bestimmten Oberbaubereich ausgewählt.

I: Tafel Oberbaubereich 3

II: Tafel Oberbaubereich 3

IV: Tafel Oberbaubereich 2

Die Zeile mit den passenden Verschiebungsfaktoren wird mit Hilfe der Deflexion D_{1800} aus den Tafeln der Anlage 3 ausgewählt.

I:

Geofon-abstand [mm]	0	200	300	450	600	900	1200	1500	1800
Verschie-bungsfaktor	2,0091	2,2934	2,4233	2,5694	2,7052	2,9618	3,1896	3,3710	3,4981

II:

Geofon-abstand [mm]	0	200	300	450	600	900	1200	1500	1800
Verschie-bungsfaktor	1,5367	1,6478	1,6953	1,7500	1,8008	1,8970	1,9844	2,0569	2,1114

IV:

Geofon-abstand [mm]	0	200	300	450	600	900	1200	1500	1800
Verschie-bungsfaktor	1,3931	1,5067	1,5572	1,6116	1,6571	1,7383	1,8022	1,8456	1,8704

3.Schritt: Verschiebung der Deflexionsmulde

Die Deflexionen der einzelnen Geofonabstände werden mit den zugehörigen Verschiebungsfaktoren multipliziert. Die Ergebnisse der Verschiebung sind in Diagramm 7.32 und Tabelle 7.11 dargestellt.

Rechnerische Untergrundkorrektur

1.Schritt: Bestimmung des Oberbaubereiches

Die Deflexion D_{1800} wird abgelesen.

I: 0,02104 mm

II: 0,03502 mm

IV: 0,03905 mm

Die Deflexionsdifferenz ($D_{\text{diff}} = D_0 - D_{1500}$) wird berechnet.

$$\text{I: } D_{\text{diff}} = 0,09299 - 0,02544 = 0,06755$$

$$\text{II: } D_{\text{diff}} = 0,14350 - 0,04254 = 0,10097$$

$$\text{IV: } D_{\text{diff}} = 0,17631 - 0,04976 = 0,12654$$

Mit Hilfe von Tabelle 7.9 und der Deflexion D_{1800} wird die Formel zur Berechnung des Oberbaumoduls ausgewählt.

$$\text{I: } E_A = 119,3 \cdot D_{\text{diff}}^{-1,472} - 172,8 = 6128,7$$

$$\text{II: } E_A = 187,8 \cdot D_{\text{diff}}^{-1,407} - 329,6 = 4399,8$$

$$\text{IV: } E_A = 187,8 \cdot D_{\text{diff}}^{-1,407} - 329,6 = 3112,7$$

2.Schritt: Bestimmung der Verschiebungsfaktoren

Mit Hilfe der Formel aus Tabelle 7.8 wurden die nachfolgenden Verschiebungsfaktoren berechnet.

I:

Geofon-abstand [mm]	0	200	300	450	600	900	1200	1500	1800
Verschiebungsfaktor	1,9182	2,2079	2,3459	2,5020	2,6295	2,8620	3,0473	3,1848	3,2849

II:

Geofon-abstand [mm]	0	200	300	450	600	900	1200	1500	1800
Verschiebungsfaktor	1,4438	1,5733	1,6287	1,6982	1,7419	1,8385	1,9030	1,9441	1,9795

IV:

Geofon-abstand [mm]	0	200	300	450	600	900	1200	1500	1800
Verschiebungsfaktor	1,3516	1,4649	1,5131	1,5745	1,6076	1,6910	1,7392	1,7644	1,7954

3.Schritt: Verschiebung der Deflexionsmulde

Die Deflexionen der einzelnen Geofone werden mit den zugehörigen Verschiebungsfaktoren multipliziert. Die Ergebnisse der Verschiebung sind in Diagramm 7.32 und Tabelle 7.11 dargestellt.

In Diagramm 7.32 sind die gemessenen Deflexionsmulden mit einer durchgezogenen Linie, die zeichnerisch Untergrundkorrigierte Deflexionsmulde mit einer gestrichelten Linie und die rechnerisch Untergrundkorrigierte Deflexionsmulde mit einer gepunkteten Linie dargestellt.

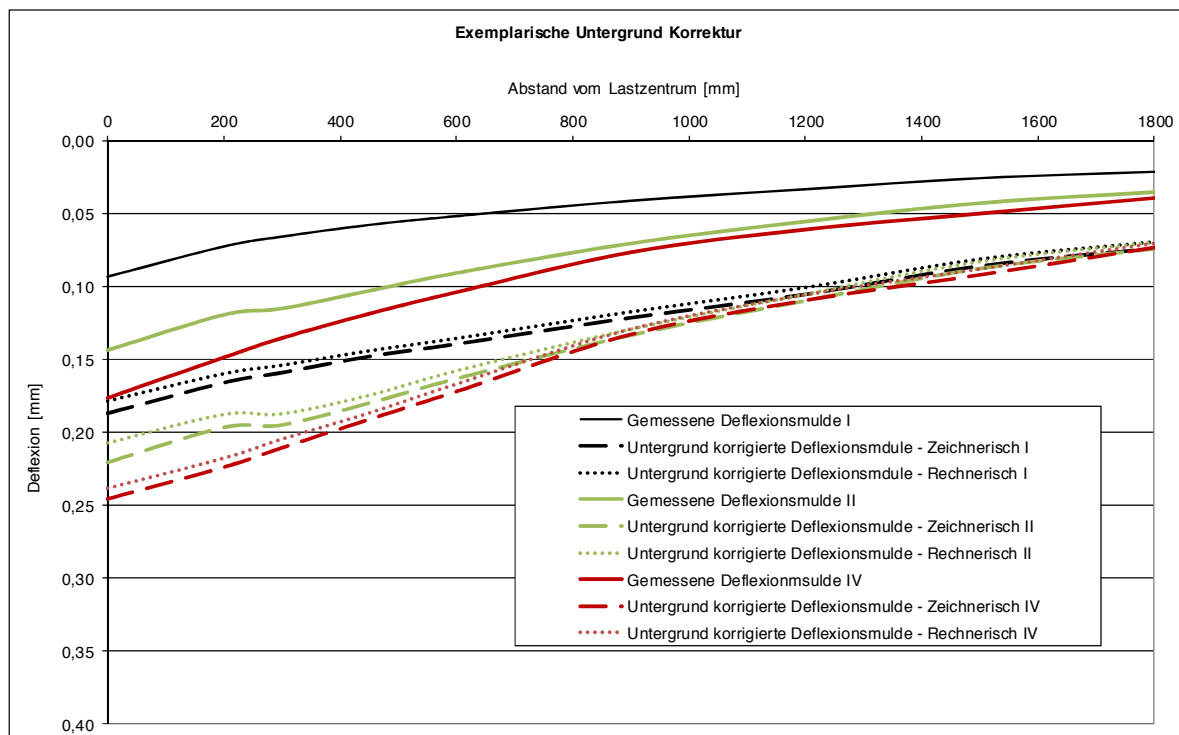


Diagramm 7.32: Exemplarische Untergrundkorrektur

In Tabelle 7.11 sind die zeichnerisch Untergrundkorrigierten Deflexionsmulden und die rechnerisch Untergrundkorrigierten Deflexionsmulden für die einzelnen Geofonabstände tabellarisch dargestellt.

Tabelle 7.11: Ergebnis der Untergrundkorrektur

Untergrundkorrigierte Deflexionsmulden									
Bauklasse nach RStO 01	Abstand zum Lastzentrum [mm]								
	0	200	300	450	600	900	1200	1500	1800
<i>Zeichnerische Untergrundkorrektur</i>									
I	0,18682912	0,16583828	0,15890431	0,14783833	0,13929648	0,12127428	0,1051816	0,08576094	0,07359762
II	0,22053082	0,19652754	0,19482672	0,17983897	0,16305452	0,13322611	0,10957476	0,08749333	0,07393157
IV	0,24562287	0,22381991	0,21053231	0,19098796	0,17188205	0,13264351	0,1093566	0,09184874	0,07303839
<i>Rechnerische Untergrundkorrektur</i>									
I	0,17837723	0,15965258	0,15383316	0,1439597	0,13539963	0,11718814	0,1004906	0,0810236	0,06911212
II	0,20719473	0,18764009	0,18717863	0,17450966	0,15772733	0,12911521	0,10507924	0,08269557	0,06931566
IV	0,23830632	0,21762474	0,20456634	0,18659383	0,16675184	0,12903513	0,10553814	0,08780813	0,07010803

8 Quantitative Bewertung der Tragfähigkeit von Asphaltstraßenbefestigung

Die quantitative Bewertung der in Abschnitt 2 beschriebenen Tragfähigkeit von Asphaltstraßenbefestigungen anhand von FWD-Messungen (vgl. Abschnitt 3) erfolgt auf der Grundlage der in Abschnitt 6 aufgestellten Tragfähigkeitsklassen, bzw. des Referenzsystems. Es ermöglicht die Zuordnung der gemessenen Deflexionsmulden zu einer Tragfähigkeitsklasse. Der für das FWD-Verfahren benötigte theoretische Hintergrund ist in Anlage 6 beschrieben.

Die Bewertung der gemessenen Deflexionsmulde erfolgt für die temperatur- und untergrundkorrigierte Deflexionsmulde, vgl. Abschnitt 6.1.3 und Abschnitt 7.7. Die Temperaturkorrektur wird nach JANSEN [31] vorgenommen und die Untergrundkorrektur nach dem im Abschnitt beschriebenen Verfahren.

Zur quantitativen Bewertung der Tragfähigkeit von Asphaltstraßenbefestigung wird der vordere Bereich der temperatur- und untergrundkorrigierten Deflexionsmulde betrachtet. Wie in Abschnitt 7 beschrieben, wirkt sich der Einfluss des Oberbaus ausschließlich auf den vorderen Bereich der Deflexionsmulde aus. Der Einfluss der Bettung auf den vorderen Bereich wird durch die Untergrundkorrektur eliminiert. Der vordere Bereich der temperatur- und untergrundkorrigierten Deflexionsmulde wird ausschließlich vom Oberbau der Asphaltstraßenbefestigung beeinflusst. Das in Abschnitt 7.5 beschriebene Verfahren zur Bestimmung des Oberbaubereichs wird zur quantitativen Bewertung der Tragfähigkeit von Asphaltstraßenbefestigung anhand der Tragfähigkeitsklassen genutzt. Durch die Ermittlung des Oberbaubereichs wurde bereits eine grundlegende Bewertung der Tragfähigkeit der Asphaltstraßenbefestigung vorgenommen.

8.1 Bestimmung der Tragfähigkeitsklassen

Nachfolgend wird ein zeichnerischer und rechnerischer Ansatz, wie schon bei der Bestimmung des Oberbaubereiches, vorgestellt.

8.1.1 Ansatz mit zeichnerischer Tragfähigkeitseinteilung (Zeichnerischer Ansatz)

Die quantitative Bewertung der Tragfähigkeit von Asphaltstraßenbefestigung erfolgt anhand der in Abschnitt 6.2 aufgestellten Tragfähigkeitsklassen. Die Zuordnung der temperatur- und untergrundkorrigierten Deflexionsmulde zu den Tragfähigkeitsklas-

sen erfolgt über die Betrachtung des vorderen Bereiches der Deflexionsmulde, wie schon bei der Bestimmung des Oberbaubereiches. Für jede Tragfähigkeitsklasse wurde dazu eine Deflexionsmulde anhand der Schichtdicken des Referenzsystems berechnet. Der Bettungsmodul wurde für alle berechneten Deflexionsmulden mit 115 MN/m^2 entsprechend dem Standard Bettungsmodul gewählt. Der zur Berechnung der Deflexionsmulden gewählte Oberbaumodul beeinflusst die spätere quantitative Bewertung der Tragfähigkeit von Asphaltstraßenbefestigung. Der Oberbaumodul wurde bereits in Abschnitt 6.2 für das Referenzsystem mit 7.000 MN/m^2 festgelegt. In Diagramm 8.1 ist für jede Tragfähigkeitsklasse eine berechnete Deflexionsmulde dargestellt.

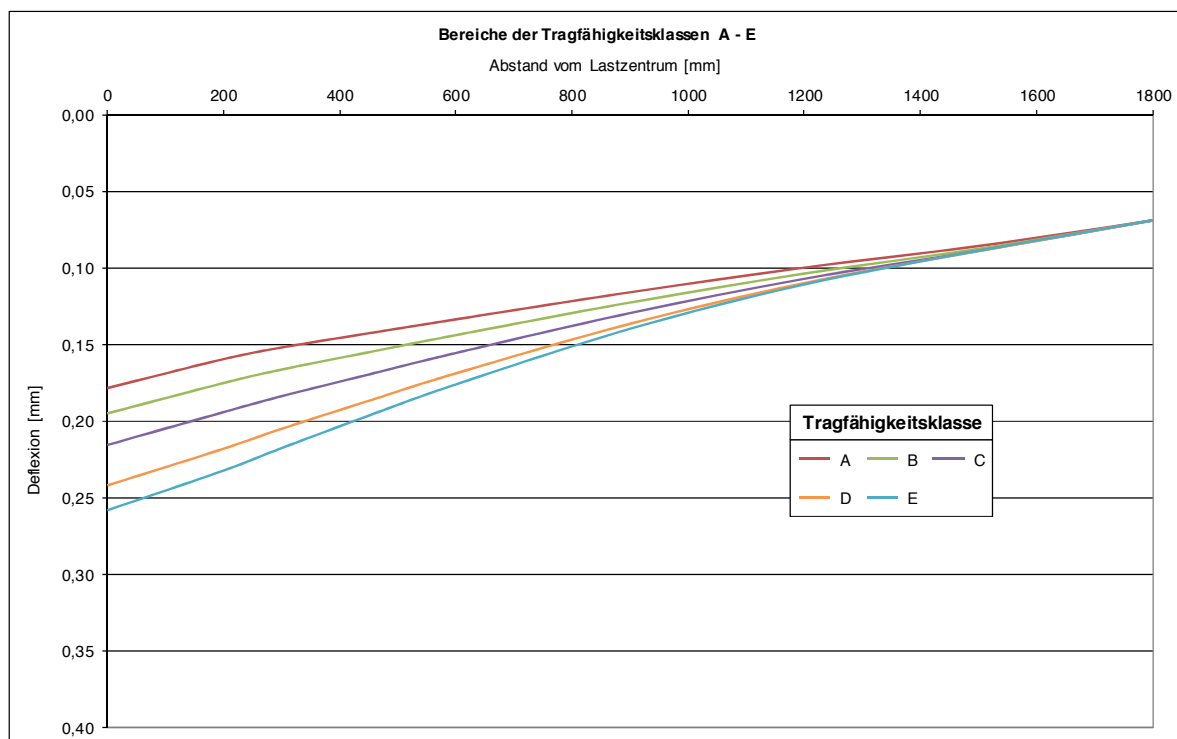


Diagramm 8.1: Berechnete Deflexionsmulden für die Tragfähigkeitsklassen A - E

Die in Diagramm 8.1 dargestellten Deflexionsmulden ermöglichen die Zuordnung einer temperatur- und untergrundkorrigierten Deflexionsmulde zur Tragfähigkeitsklasse. Die dargestellten Deflexionsmulden begrenzen die einzelnen Bereiche der Tragfähigkeitsklassen. In Anlage 4 sind die Deflexionen der berechneten Deflexionsmulden für die Tragfähigkeitsklassen tabellarisch dargestellt.

In Diagramm 8.2 sind zusätzlich zu den berechneten Deflexionsmulden die Bereiche der Tragfähigkeitsklassen farblich dargestellt. Die Tragfähigkeitsklassen A bis E sind in unterschiedlichen Grüntönen dargestellt. Die Tragfähigkeitsklasse F ist, zur Verdeutlichung, dass die Asphaltbefestigung nicht tragfähig ist, in Rot dargestellt.

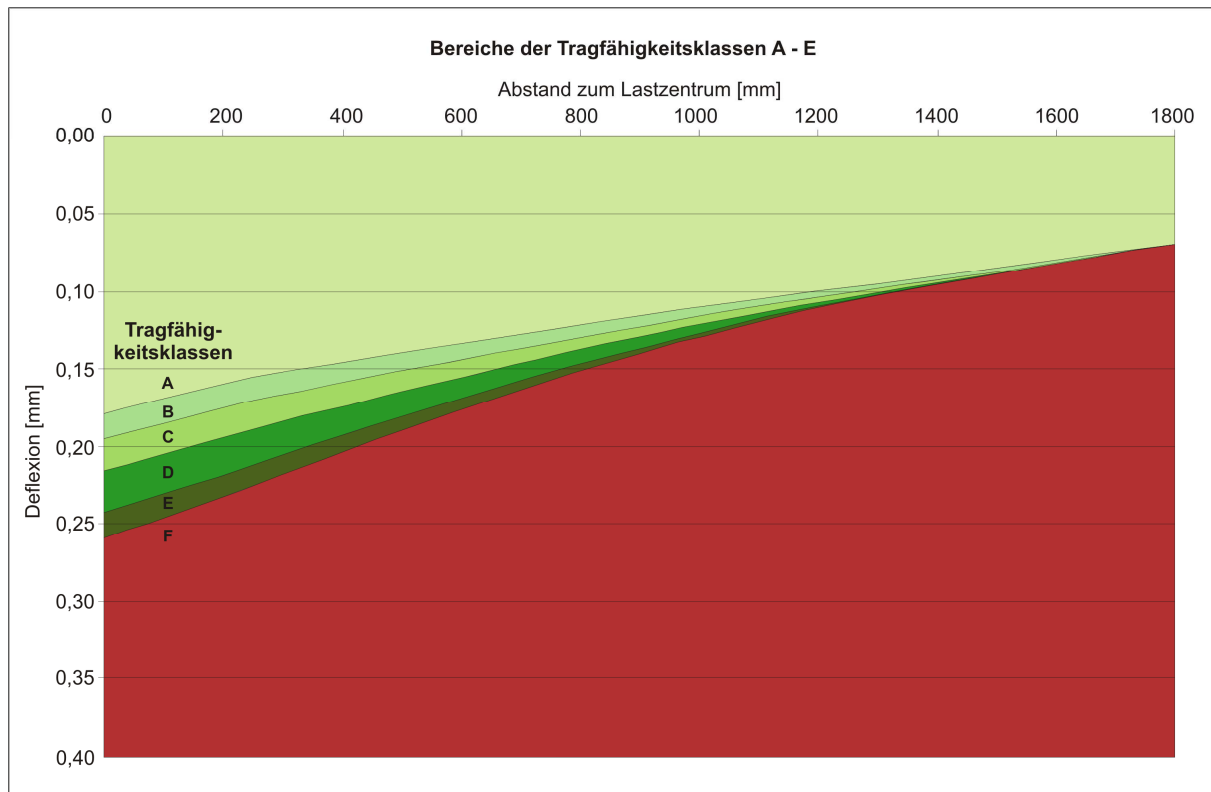


Diagramm 8.2: Bereiche der Tragfähigkeitsklassen A - E

Die temperatur- und untergrundkorrigierte Deflexionsmulde wird in das Diagramm eingezeichnet und einer Tragfähigkeitsklasse zugeordnet. In Diagramm 8.3 ist eine temperatur- und untergrundkorrigierte Deflexionsmulde exemplarisch in die Bereiche der Tragfähigkeitsklassen eingezeichnet. Die temperatur- und untergrundkorrigierte Deflexionsmulde wird der Tragfähigkeitsklasse D zugeordnet.

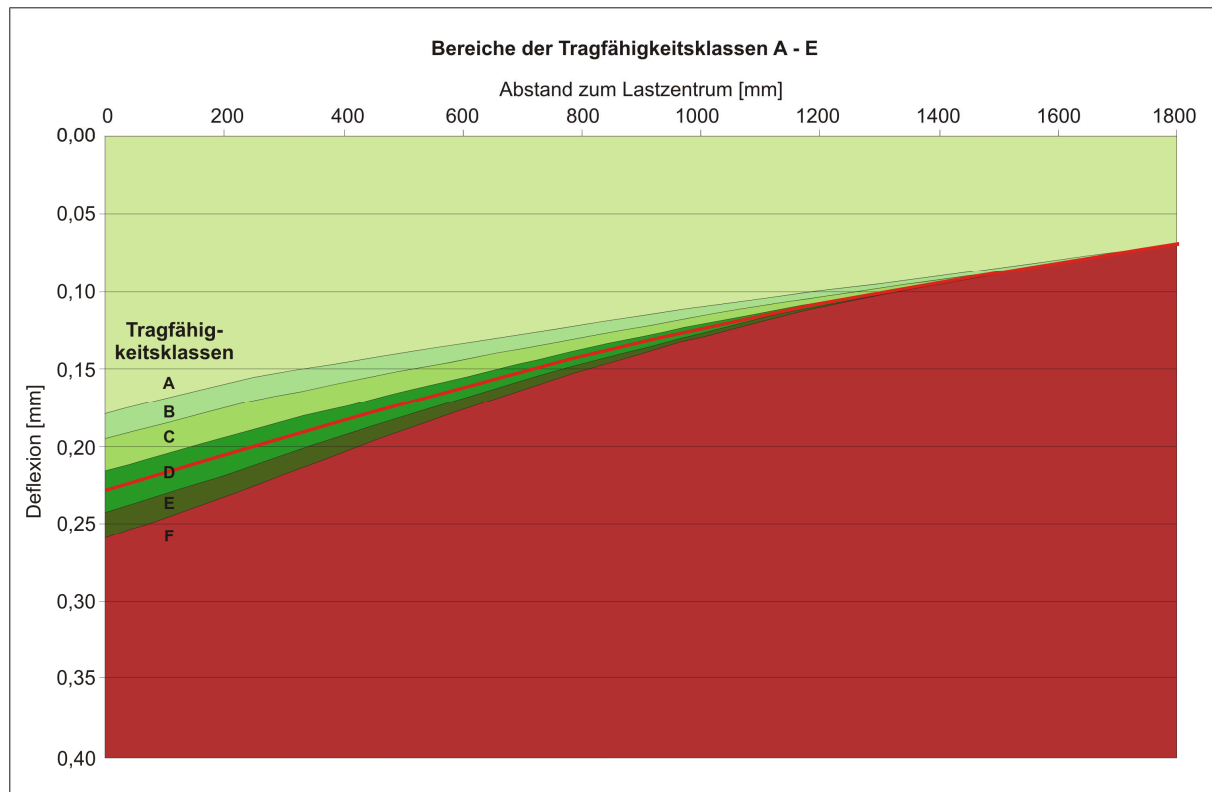


Diagramm 8.3: Bestimmung der Tragfähigkeitsklassen A – E

8.1.2 Ansatz mit rechnerischer Tragfähigkeitsklasseneinteilung (Rechnerischer Ansatz)

Neben dem in Abschnitt 8.1.1 vorgestellten zeichnerischen Ansatz wird nachfolgend ein rechnerischer Ansatz zur Bestimmung der Tragfähigkeitsklasse vorgestellt. Der rechnerische Lösungsansatz ermöglicht eine einfache und EDV unterstützte Bestimmung der Tragfähigkeitsklasse.

Der in Abschnitt 8.1.1 beschriebene Ansatz zur Bestimmung der Tragfähigkeitsklassen erfolgt durch die Betrachtung des vorderen Bereiches der Deflexionsmulde. Der vordere Bereich der Deflexionsmulde ist als der Bereich vom Lastzentrum bis zum Abstand von 1500 mm vom Lastzentrum entfernt definiert und kann wie in Abschnitt 7.5.3.2 beschrieben anhand der Deflexionsdifferenz D_{diff} nach (7.3) berechnet werden. Um die Deflexionsdifferenz einer der sechs Tragfähigkeitsklassen zuordnen zu können muss für jede Tragfähigkeitsklasse der zugehörige Bereich der Deflexionsdifferenz bestimmt werden. In Tabelle 8.1 sind hierzu die in Abschnitt 8.1.1 berechneten Deflexionsmulden, welche die Grenzen der Tragfähigkeitsklassen darstellen, tabellarisch dargestellt.

Tabelle 8.1: Berechnete Deflexionsmulden für die Tragfähigkeitsklassen A - E

Tragfähigkeitsklasse	Deflexion [mm] am Abstand zum Lastzentrum [mm]								
	0	200	300	450	600	900	1200	1500	1800
A	0,17850	0,15960	0,15200	0,14270	0,13360	0,11590	0,09981	0,08572	0,06900
B	0,19510	0,17520	0,16640	0,15510	0,14390	0,12260	0,10370	0,08755	0,06900
C	0,21570	0,19420	0,18380	0,16960	0,15560	0,12950	0,10710	0,08877	0,06900
D	0,24210	0,21810	0,20510	0,18680	0,16890	0,13650	0,10990	0,08910	0,06900
E	0,25830	0,23240	0,21770	0,19650	0,17610	0,13980	0,11080	0,08881	0,06900

Die Deflexionsdifferenz wurde für die obere und untere Grenze jeder Tragfähigkeitsklasse aus Tabelle 8.1 berechnet vgl. Tabelle 8.2. Aus der berechneten Deflexionsdifferenz der oberen und unteren Grenze bilden sich für jede Tragfähigkeitsklasse die Bereiche der Deflexionsdifferenz. Die Tragfähigkeitsklasse A besitzt keine obere Grenze und die Tragfähigkeitsklasse F keine untere Grenze.

Tabelle 8.2: Bestimmung der Tragfähigkeitsklassen mit der Deflexionsdifferenz

Tragfähigkeitsklasse	obere Grenze [mm]			untere Grenze [mm]			Bereich der Deflexionsdifferenz D_{diff} [mm]	
	D_0	D_{1500}	D_{diff}	D_0	D_{1500}	D_{diff}	von	bis
A	-			0,1785	0,08572	0,09278	-	0,09278
B	0,17850	0,08572	0,09278	0,19510	0,08755	0,10755	0,09278	0,10755
C	0,19510	0,08755	0,10755	0,21570	0,08877	0,12693	0,10755	0,12693
D	0,21570	0,08877	0,12693	0,24210	0,08910	0,15300	0,12693	0,15300
E	0,24210	0,08910	0,15300	0,25830	0,08881	0,16949	0,15300	0,16949
F	0,25830	0,08881	0,16949	-			0,16949	-

Die berechnete Deflexionsdifferenz D_{diff} der temperatur- und untergrundkorrigierten Deflexionsmulde kann anhand Tabelle 8.1 einem Bereich der Deflexionsdifferenz zugeordnet werden und die Tragfähigkeitsklasse bestimmt werden.

8.2 Ablauf der quantitativen Bewertung von Asphaltbefestigungen

Nachfolgend wird der Ablauf der quantitativen Bewertung von Asphaltbefestigungen zur Bestimmung der Tragfähigkeitsklasse vorgestellt. In Abbildung 8.1 ist der Ablauf zur Bestimmung der Tragfähigkeitsklasse dargestellt.

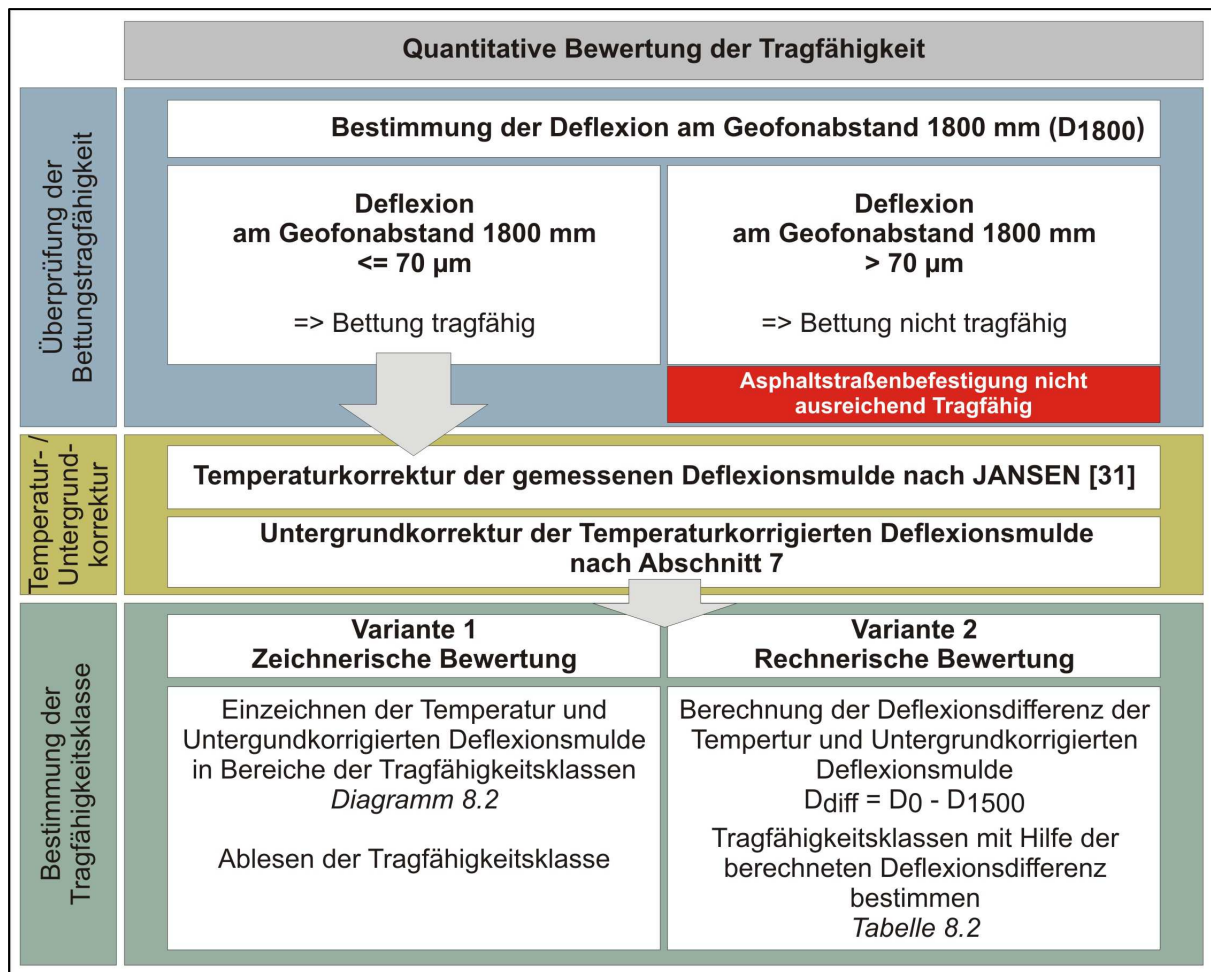


Abbildung 8.1: Ablauf der quantitativen Bewertung der Tragfähigkeit von Asphaltbefestigungen

Mit Hilfe der Deflexion D_{1800} wird die Tragfähigkeit der Bettung überprüft. Die Bettung ist nicht ausreichend tragfähig (Bettungsmodul $< 115 \text{ MN/m}^2$), wenn die Deflexion $D_{1800} < 0,07 \text{ mm}$ ist.

Ist die Deflexion $D_{1800} \geq 0,07 \text{ mm}$ ist die Bettung ausreichend tragfähig (Bettungsmodul $\geq 115 \text{ MN/m}^2$) und die Tragfähigkeitsklasse kann bestimmt werden. Die gemessene Deflexionsmulde wird zur Bestimmung der Tragfähigkeitsklasse nach JANSEN [31] temperaturkorrigiert und anschließend nach Abschnitt 7.7 untergrundkorrigiert. Die Bestimmung der Tragfähigkeitsklasse kann anhand der temperatur- und untergrundkorrigierten Deflexionsmulde zeichnerisch oder rechnerisch erfolgen.

Variante 1: Zeichnerische Bewertung

Die temperatur- und untergrundkorrigierte Deflexionsmulde wird in die Bereiche der Tragfähigkeitsklassen (Diagramm 8.2) eingezeichnet um die Tragfähigkeitsklasse zu bestimmen.

Der Verlauf der temperatur- und untergrundkorrigierten Deflexionsmulde wird einem Bereich der Tragfähigkeitsklassen zugeordnet. Die Tragfähigkeitsklasse der gemessenen Deflexionsmulden entspricht der des zugeordneten Bereichs der Tragfähigkeitsklassen.

Variante 2: Rechnerische Bewertung

Die Deflexionsdifferenz wird mit (7.3) für die temperatur- und untergrundkorrigierte Deflexionsmulde berechnet. Mit der berechneten Deflexionsdifferenz wird die Tragfähigkeitsklasse der gemessenen Deflexionsmulde aus Tabelle 8.2 bestimmt.

Der Algorithmus zur quantitativen Bewertung der Tragfähigkeit von Asphaltstraßenbefestigungen ist in Anlage 7 zusammengefasst.

8.3 Exemplarische quantitative Bewertung von Asphaltbefestigungen

Die quantitative Bewertung von Asphaltbefestigungen wird nachfolgend für die in Tabelle 8.3 dargestellten gemessenen Deflexionsmulden exemplarisch vorgeführt. In Tabelle 8.3 sind die vorhandenen Bauklassen nach RSTO 01 und die gemessenen Deflexionen für die einzelnen Abstände zum Lastzentrum der gemessenen Deflexionsmulden dargestellt. Für die Temperaturkorrektur sind zusätzlich die während der Messung ermittelten Asphaltkörpertemperaturen in 5 cm Tiefe nach JANSEN [31] dargestellt. Der Verlauf der gemessenen Deflexionsmulden ist in Diagramm 8.4 dargestellt.

Tabelle 8.3: Gemessene Deflexionsmulden

Gemessene Deflexionsmulden (Lastkorrigiert auf 50KN)										
Bauklasse nach RStO 01	Abstand zum Lastzentrum [mm]									Asphaltkörper- temperatur in 5cm Tiefe
	0	200	300	450	600	900	1200	1500	1800	
I	0,10479	0,08022	0,07188	0,06165	0,05408	0,04095	0,03298	0,02544	0,02104	27
II	0,12506	0,10514	0,10096	0,09173	0,08360	0,07023	0,05522	0,04254	0,03502	10
IV	0,15785	0,13420	0,12161	0,10660	0,09715	0,07631	0,06068	0,04976	0,03905	12

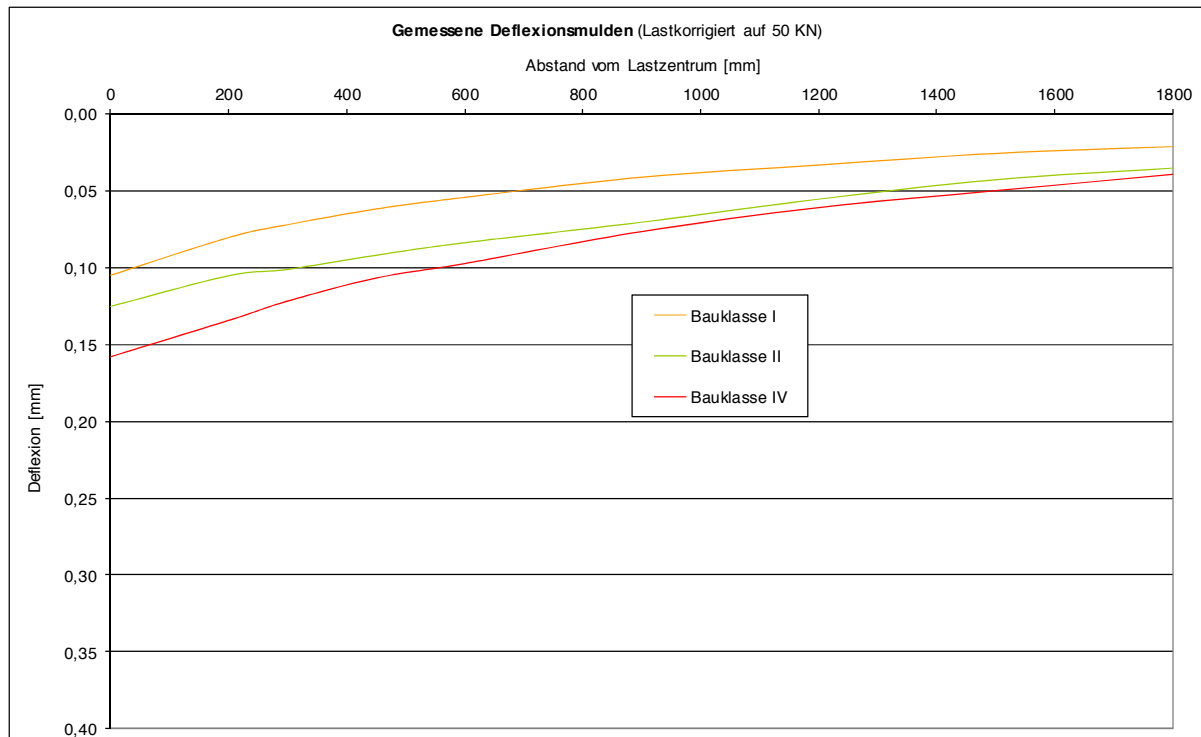


Diagramm 8.4: Gemessene Deflexionsmulden

1.Schritt: Überprüfung der Bettungstragfähigkeit

Die Deflexion D_{1800} wird abgelesen und überprüft, ob die Bettung ausreichend Tragfähig ($D_{1800} < 0,07$ mm) ist.

I: 0,02104 mm < 0,07 mm ► **Bettung tragfähig**

II: 0,03502 mm < 0,07 mm ► **Bettung tragfähig**

IV: 0,03905 mm < 0,07 mm ► **Bettung tragfähig**

2.Schritt: Temperatur-/Untergrundkorrektur

Die gemessene Deflexionsmulde wird nach JANSEN [31] auf 20°C temperaturkorrigiert:

Temperaturkorrigierte Deflexionsmulden									
Bauklasse nach RStO 01	Abstand zum Lastzentrum [mm]								
	0	200	300	450	600	900	1200	1500	1800
I	0,09299	0,07231	0,06557	0,05754	0,05149	0,04095	0,03298	0,02544	0,02104
II	0,14350	0,11926	0,11492	0,10276	0,09054	0,07023	0,05522	0,04254	0,03502
IV	0,17631	0,14855	0,13519	0,11851	0,10372	0,07631	0,06068	0,04976	0,03905

Die temperaturkorrigierte Deflexionsmulde wird nach Abschnitt 7.7 untergrundkorrigiert:

Untergrundkorrigierte Deflexionsmulden									
Bauklasse nach RStO 01	Abstand zum Lastzentrum [mm]								
	0	200	300	450	600	900	1200	1500	1800
I	0,18683	0,16584	0,15890	0,14784	0,13930	0,12127	0,10518	0,08576	0,07360
II	0,22053	0,19653	0,19483	0,17984	0,16305	0,13323	0,10957	0,08749	0,07393
IV	0,24562	0,22382	0,21053	0,19099	0,17188	0,13264	0,10936	0,09185	0,07304

3.Schritt: Bestimmung der Tragfähigkeitsklasse

Variante 1: Zeichnerische Bewertung

Die Tragfähigkeitsklasse wird durch Einzeichnen der temperatur- und untergrundkorrigierten Deflexionsmulde in die Bereiche der Tragfähigkeit (Diagramm 8.2) bestimmt.

I: **Tragfähigkeitsklasse B** (vgl. Diagramm 8.5)

II: **Tragfähigkeitsklasse D** (vgl. Diagramm 8.5)

IV: **Tragfähigkeitsklasse E** (vgl. Diagramm 8.5)

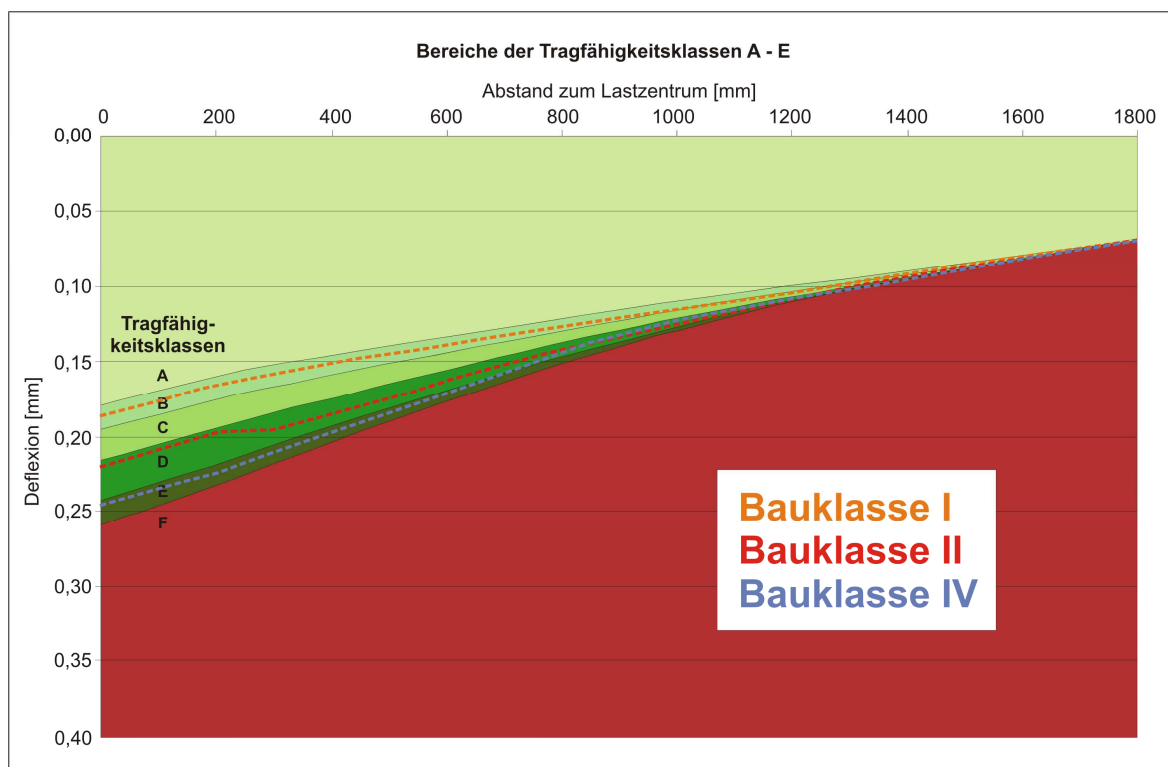


Diagramm 8.5: Exemplarische Zeichnerische Bestimmung der Tragfähigkeitsklasse

Variante 2: Rechnerische Bewertung

Alternativ kann die Tragfähigkeitsklasse mit Hilfe der berechneten Deflexionsdifferenz ($D_{diff} = D_0 - D_{1500}$) und Tabelle 8.2 bestimmt werden.

$$\text{I: } D_{diff} = 0,18683 - 0,08576 = 0,10107 \quad \Rightarrow \text{Tragfähigkeitsklasse B}$$

$$\text{II: } D_{diff} = 0,22053 - 0,08749 = 0,13304 \quad \Rightarrow \text{Tragfähigkeitsklasse D}$$

$$\text{IV: } D_{diff} = 0,24562 - 0,09185 = 0,15377 \quad \Rightarrow \text{Tragfähigkeitsklasse E}$$

4.Schritt: Auswertung der bestimmten Tragfähigkeitsklasse

I: Tragfähigkeitsklasse B

Die Tragfähigkeitsklasse B entspricht der Belastungsklasse Bk32 und somit einer Verkehrsbeanspruchung von 10 -32 Millionen Äquivalenten 10t-Achsübergängen. Die ermittelte Tragfähigkeitsklasse der als Bauklasse I (10 -32 Millionen Äquivalenten 10t-Achsübergängen) gebauten Asphaltstraßenbefestigung ist somit ausreichend. Es wäre somit keine Erhaltungsmaßnahme aufgrund der Tragfähigkeit der Asphaltstraßenbefestigung erforderlich.

II: Tragfähigkeitsklasse D

Die Tragfähigkeitsklasse D entspricht der Belastungsklasse Bk3,2 und somit einer Verkehrsbeanspruchung von 1,8 -3,2 Millionen Äquivalenten 10t-Achsübergängen. Die ermittelte Tragfähigkeitsklasse der als Bauklasse II (3-10 Millionen Äquivalenten 10t-Achsübergängen) gebauten Asphaltstraßenbefestigung ist somit nicht ausreichend. Es wäre somit eine Erhaltungsmaßnahme anhand der quantitativen Bewertung zu planen.

IV: Tragfähigkeitsklasse E

Die Tragfähigkeitsklasse E entspricht der Belastungsklasse Bk1,8 und somit einer Verkehrsbeanspruchung von 1,0 -1,8 Millionen Äquivalenten 10t-Achsübergängen. Die ermittelte Tragfähigkeitsklasse der als Bauklasse IV (0,3-0,8 Millionen Äquivalenten 10t-Achsübergängen) gebauten Asphaltstraßenbefestigung ist somit ausreichend. Es wäre somit keine Erhaltungsmaßnahme aufgrund der Tragfähigkeit der Asphaltstraßenbefestigung erforderlich.

8.4 Vergleich mit qualitativen Bewertung nach JENDIA

Um den Vorschritt des in dieser Arbeit vorgestellten quantitativen Bewertungshintergrund zu verdeutlichen, wurden die gemessenen Deflexionsmulden (Tabelle 8.2) zusätzlich nach JENDIA[31] (vgl. Abschnitt 5.1) qualitativ bewertet. Die Ergebnisse der qualitativen Bewertung sind in Tabelle 8.3 dargestellt.

Tabelle 8.4: Qualitative Bewertung der gemessenen Deflexionsmulden nach JENDIA

Bauklasse nach RStO 01	UI	Tz	Bereich UI-Tz-Diagramm	Untergrund	Gesamtsystem
I	15,6	3,4	1	ausreichend tragfähig	ausreichend tragfähig
II	27,7	2,7	1	ausreichend tragfähig	ausreichend tragfähig
IV	26,5	2,0	1	ausreichend tragfähig	ausreichend tragfähig

Die gemessenen Deflexionsmulden liegen nach JENDIA[31] alle im Bereich 1 des UI-Tz-Diagramms. Dies bedeutet, dass die Tragfähigkeit des Untergrund und des Gesamtsystems nach JENDIA ausreichend ist. Eine weitergehende Aussage, welche die Asphaltstraßenbefestigung hinsichtlich der vorhandenen Verkehrsbelastung (vgl. Abschnitt 2) als ausreichend tragfähig oder nicht tragfähig beurteilt, ist nicht möglich. Die quantitative Bewertung im vorherigen Abschnitt hat aber gezeigt, dass die Asphaltstraßenbefestigung hinsichtlich der Verkehrsbelastung für die Sie gebaut wurde, nicht ausreichend tragfähig ist.

Der in dieser Arbeit vorgestellte quantitative Bewertungshintergrund ermöglicht somit eine weitergehende Aussage darüber, ob eine Asphaltstraßenbefestigung hinsichtlich der vorhandenen Verkehrsbelastung ausreichend tragfähig ist oder nicht. Sollte die Tragfähigkeit der Asphaltstraßenbefestigung nicht ausreichend sein, kann anhand der quantitativen Bewertung die Erhaltungsmaßnahme geplant werden.

9 Zusammenfassung und Ausblick

9.1 Zusammenfassung

In Deutschland werden aufgrund des Oberflächenzustandes einer Straßenbefestigung die Streckenabschnitte ausgewählt, auf denen Erhaltungsmaßnahmen durchzuführen sind. Anschließend wird auf Objektebene die Erhaltungsmaßnahme geplant. Zur Planung und Optimierung von Erhaltungsmaßnahmen auf Objektebene sind umfangreiche Untersuchungen durchzuführen. In diesem Zusammenhang ist eine Beurteilung der Tragfähigkeit (vgl. Abschnitt 2) mit dem Falling-Weight-Deflectometer (FWD) (vgl. Abschnitt 3 und Anlage 6) von großer Bedeutung. Da aber ein geeigneter quantitativer Bewertungshintergrund für FWD-Messungen fehlt, wird die Tragfähigkeit bei der Planung von Erhaltungsmaßnahmen auf der Objektebene nicht mit einbezogen.

Das Ziel dieser Arbeit ist die Schaffung eines qualitativen Bewertungshintergrundes zur Bewertung der Tragfähigkeit von Asphaltstraßenbefestigungen aufgrund von FWD-Messungen. Dazu sind die mit dem FWD gemessenen Deflexionsmulden hinsichtlich der Tragfähigkeit der Asphaltstraßenbefestigung zu interpretieren. Der Bewertungshintergrund soll eine Einordnung der Tragfähigkeit in ein vorgegebenes Bewertungsschema ermöglichen. Aufgrund dieses Bewertungsschemas soll eine Aussage darüber möglich sein, ob eine Asphaltstraßenbefestigung hinsichtlich der vorhandenen Verkehrsbelastung ausreichend tragfähig ist oder nicht. Sollte die Tragfähigkeit der Asphaltstraßenbefestigung nicht ausreichend sein, kann anhand der quantitativen Bewertung die Erhaltungsmaßnahme geplant werden. Hierzu wurde ein quantitativer Bewertungshintergrund, welches eine Einordnung der Tragfähigkeit in ein vorgegebenes Bewertungsschema ermöglicht, erstellt. Das Bewertungsschema wurde in Anlehnung an die Belastungsklassen der RStO 12 [44] für ein Zweischichtsystem (Oberbau und Untergrund) erstellt. Das an die RStO 12 [44] angelehnte Bewertungsschema ermöglicht Rückschlüsse auf die vorhandene IST-Belastungsklasse und einen Vergleich mit der erforderlichen Soll-Belastungsklasse. Das aufgestellte Bewertungsschema umfasst fünf Tragfähigkeitsklassen (A – E), welche jeweils einer Belastungsklasse und somit einen Bereich der Verkehrsbeanspruchung zugeordnet sind. Die Tragfähigkeitsklasse F entspricht einer Belastungsklasse, bzw. Verkehrsbeanspruchung, die geringer als Belastungsklasse Bk_{1,8} ist.

Es wurde gezeigt, dass für die quantitative Bewertung einer Asphaltstraßenbefestigung der Einfluss des Untergrundes berücksichtigt werden muss. Die Berücksichtigung des Untergrund-E-Moduls wird anhand einer Korrektur des Untergrund-E-Moduls auf einen festgelegten „Standard“ Untergrund-E-Modul durchgeführt. Hierzu wurde der Begriff der Bettung eingeführt, welcher einer Unterlage für die Asphaltstraßenbefestigung beschreibt. Anhand der Deflexion D_{1800} kann der E-Modul der Bettung (Bettungsmodul E_0) bestimmt werden. Die Tragfähigkeit der Bettung, ausgedrückt durch den Bettungsmodul E_0 , wird aus der gemessenen Deflexion D_{1800} mit einem Mehrschichtenprogramm zurückgerechnet.

Die Untergrundkorrektur wird anhand einer Verschiebung der gemessenen Deflexionsmulde durchgeführt. Die Verschiebung der Deflexionsmulde erfolgt in Abhängigkeit vom Abstand zum Lastzentrum und wurde als ungleichmäßige Verschiebung bezeichnet. Zur Verschiebung der gemessenen Deflexionsmulde wurden Tafeln mit Verschiebungsfaktoren erstellt, welche mit den gemessenen Deflexionen der einzelnen Geofonabstände multipliziert werden. Die Auswahl der passenden Verschiebungsfaktoren erfolgt über den E-Modul des Oberbaus (Oberbaumodul E_A) und Bettungsmodul der gemessenen Deflexionsmulde. Der Oberbaumodul beeinflusst ausschließlich den Verlauf im vorderen Bereich der Deflexionsmulde ($< 1.500\text{m}$ vom Lastzentrum entfernt). Die Berücksichtigung des Oberbaumoduls erfolgt durch Oberbaubereiche, welche den Verlauf im vorderen Bereich der Deflexionsmulde berücksichtigen. Jedem Oberbaubereich ist eine eigene Tafel mit Verschiebungsfaktoren für unterschiedliche Bettungsmoduln zugeordnet. Die Zeile mit den passenden Verschiebungsfaktoren kann anhand des Bettungsmoduls ausgewählt werden. Neben diesem zeichnerischen Ansatz wurde ein rechnerischer Ansatz zur Untergrundkorrektur vorgestellt. Die rechnerische Untergrundkorrektur ermöglicht eine einfache und EDV-unterstützte Untergrundkorrektur.

Die Bewertung der gemessenen Deflexionsmulde erfolgt für die temperatur- und untergrundkorrigierte Deflexionsmulde. Die Temperaturkorrektur wird nach JANSEN [31] vorgenommen und die Untergrundkorrektur nach dem in dieser Arbeit beschriebenen Verfahren. Die quantitative Bewertung der Tragfähigkeit von Asphaltstraßenbefestigungen erfolgt anhand der aufgestellten Tragfähigkeitsklassen. Die Zuordnung der temperatur- und untergrundkorrigierten Deflexionsmulde zu den Tragfähigkeitsklassen erfolgt über die Betrachtung des vorderen Bereiches der Deflexionsmulde, wie schon bei der Bestimmung des Oberbaubereiches. Für jede Tragfähigkeitsklasse

wurde dazu eine Deflexionsmulde anhand der Schichtdicken eines Referenzsystems berechnet. Die berechneten Deflexionsmulden begrenzen die einzelnen Bereiche der Tragfähigkeitsklassen. Die Bereiche der Tragfähigkeitsklassen ermöglichen die Zuordnung der temperatur- und untergrundkorrigierten Deflexionsmulde zur Tragfähigkeitsklasse. Neben diesem zeichnerischen Ansatz wurde ein rechnerischer Ansatz zur Bestimmung der Tragfähigkeitsklasse vorgestellt. Der rechnerische Lösungsansatz ermöglicht eine einfache und EDV-unterstützte Bestimmung der Tragfähigkeitsklasse.

Der Ablauf der quantitativen Bewertung der Tragfähigkeit einer Asphaltstraßenbefestigung wurde beschrieben und anhand gemessener Deflexionsmulden vorgeführt.

9.2 Ausblick

Zur Planung und Optimierung von Erhaltungsmaßnahmen auf Objektebene sind umfangreiche Untersuchungen durchzuführen. In diesem Zusammenhang ist eine Beurteilung der Tragfähigkeit von großer Bedeutung. Die Tragfähigkeit einer Asphaltstraßenbefestigung kann zukünftig mit Hilfe des in dieser Arbeit vorgestellten Ansatzes zur quantitativen Bewertung der Tragfähigkeit von Asphaltbefestigungen für eine vorausschauende Planung von Erhaltungsmaßnahmen und deren Kostenoptimierung mit einbezogen werden. Hierzu ist bei der Planung der Erhaltungsmaßnahmen die ermittelte Tragfähigkeitsklasse und die vorhandene Verkehrsbelastung zu berücksichtigen.

Quellenverzeichnis

Literaturverzeichnis

- [1] Achenbach, J. D.: Wave Propagation in Elastic Solids, North-Holland Publishing Company, 1980
- [2] Arbeitspapier Tragfähigkeit, Teil A „Messverfahren“ (Entwurf), FGSV Arbeitskreis 4.5.2, stand Juli 2012
- [3] Arbeitspapier Tragfähigkeit. Teil B 2.1: Falling Weight Deflectometer (FWD): Gerätebeschreibung, Messdurchführung – Asphaltbauweisen, FGSV, 2008
- [4] Arbeitspapier Tragfähigkeit, Teil C 2 „Auswertung und Bewertung“ (Entwurf), FGSV Arbeitskreis 4.5.2, stand 2006
- [5] Bald, J.S.; Grätz, B.: Einfluß der Temperatur, der Belastungsfrequenz und der Impulskraft beim Falling-Weight-Deflectometer (FWD) auf die Größe der effektiven Schicht-E-Moduli, FE 04.174, Fachgebiet Straßenwesen mit Versuchsanstalt der TU Darmstadt, 1999
- [6] Baum, G.; Behr, H.; Buseck, H.: Die Reaktion von Straßen bei zeitabhängiger Belastung, Teil 1 und Teil 2, Wissenschaftliche Berichte, Heft 4, 1965, Bundesanstalt für Straßenbau, Köln
- [7] Baum, G.; Hürtgen, H.: Die Reaktion von Straßen bei zeitabhängiger Belastung, Wissenschaftliche Berichte, Heft 8, Bundesanstalt für Straßenwesen, Köln, 1969
- [8] Beckedahl, H.; Hürtgen, H.; Straube, E.: Begleitende Forschung zur Einführung des Falling Weight Deflectometer (FWD) in der Bundesrepublik Deutschland, Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Bundesministerium für Verkehr, Heft 59, 2011
- [9] Burmister, D. M.: The General Theory of Stresses and Displacements in Layered Systems, Columbia University, New York, 1944
- [10] Burmister, D. M. The Theory of Stresses and Displacements in Layered Systems and Applications to the Design of Airport Runways. Proceedings, Highway Research Board, Vol. 23, 1943.
- [11] Chakar, T.: Methode zur Klassifizierung von Tragfähigkeitsmessergebnissen des Falling-Weight-Deflectometers bei Asphaltbefestigungen, Universität Karlsruhe, Schriftenreihe des Institut für Straßen- und Eisenbahnwesen, Heft 45, 2011
- [12] De Jong, D. L.; Peutz, M. G. F.; Korswagen, A. R.: Computer Program BISAR (Layered Systems under normal and tangential surface loads), Koninklijke Shell Laboratorium, Amsterdam, 1973
- [13] COST-Action 336, Herausgeber Falling Weight Deflectometer for Measuring Bearing Capacity, Final Report, 2000.
- [14] Durth, W.; Grätz, B.: Überprüfung praktischer Methoden zur Messung der Tragfähigkeit und Einschätzung der Restnutzungsdauer, insbesondere für Straßen auf dem Gebiet der neuen Bundesländer, FE 04.162, Versuchsanstalt für Straßenwesen der TH Darmstadt, 1995

- [15] Eisenmann, J.; Lempe, U.; Leykauf, G.: Straßenbeanspruchung. Mittelungen des Prüfamtes für Bau von Landverkehrswegen der Technischen Universität München, Heft 26, München, 1976
- [16] Ewing, W. M.; Jardetzky, W. S.; Press, F.: Elastic Waves in Layered Media, McGraw-Hill Book Company, Inc., New York/Toronto/London, 1957
- [17] Fuchs, M.: Fallgewichtsdeflektionsmessungen zur Tragfähigkeitsbestimmungen (Endbericht COST 336), Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, Wien, 2001
- [18] Gerthsen-Kneser-Vogel: Physik, Berlin 1982
- [19] Grätz, B.: Bewertung der Tragfähigkeit und der Standfestigkeit bestehender Asphaltstraßen zur Wahl zweckmäßiger Erhaltungsmaßnahmen, Habilitation, TU Darmstadt, 2009
- [20] Grätz, B.: Literaturstudie zu FE 04.162 „Überprüfung praktischer Methoden zur Messung der Tragfähigkeit und Einschätzung der Restnutzungsdauer, insbesondere für Straßen auf dem Gebiet der neuen Bundesländer, Versuchsanstalt für Straßenwesen der TH Darmstadt, 1995
- [21] Grätz, B.; Hou, X.: Dynamisch belasteter Halbraum - allgemeine Lösung der zweidimensionalen (axialsymmetrischen) Wellengleichungen -, Versuchsanstalt für Straßenwesen der TU Darmstadt, unveröffentlicht, 1997
- [22] Grätz, B.; Hothan, J.; Karcher, C.; Straube, E.; Weingart, W.: Zerstörungsfreie Ermittlung des Bettungsmoduls von Asphaltbefestigungen durch FWD-Messungen, Veröffentlichung der Arbeitsgemeinschaft universitärer FWD Betreiber (AUF), März 2009
- [23] Grätz, B.: Möglichkeiten und Grenzen des Falling-Weight-Deflectometer, Straße und Autobahn, Heft 1/2001
- [24] Grätz, B.: Langzeitverhalten von Instandsetzungsmaßnahmen – Dynamische Prüfung der Tragfähigkeit und der Struktur der Unterlage, Festkolloquium 75 Jahre Versuchsanstalt für Straßenwesen der TU Darmstadt, 2001
- [25] Gerlach, J.: Bemessung der Fahrbahnbefestigungen, Vorlesung TH 26008, Fachgebiet Konstruktiver Straßenbau, Universität Hannover, 1992
- [26] Gerlach, J.: Zur Beurteilung der Standfestigkeit von Fahrbahnaufbauten mit Hilfe statisch-elastizitätstheoretischer Berechnungen, Dissertation, TH Hannover, 1967
- [27] Gerlach, J.: Stand und Entwicklung von Bemessungsverfahren für Straßen und Flugplatzbefestigungen, Habilitationsschrift, TU Hannover, 1971
- [28] Haupt, W.: Bodendynamik (Grundlagen und Anwendung), Friedr. Vieweg & Sohn, Braunschweig/Wiesbaden, 1986
- [29] Haupt, W.: Verhalten von Oberflächenwellen im inhomogenen Halbraum mit besonderer Berücksichtigung der Wellenabschirmung, Veröffentlichungen des Institutes für Bodenmechanik und Felsmechanik der Universität Fridericiana in Karlsruhe, Heft 74, 1978
- [30] Horz, H.W.: Fallgewichtsgerät FWD bei der Bundesanstalt für Straßenwesen, Straße und Autobahn, Heft 3/1992

- [31] Jansen, D: Temperaturkorrektur von mit dem Falling-Weight-Deflectometer gemessenen Deflexionen auf Asphaltbefestigungen, Universität Duisburg-Essen, Institut für Straßenbau und Verkehrswesen, Heft 2, 2009
- [32] Jendia, S.: Bewertung der Tragfähigkeit von bituminösen Straßenbefestigungen, Universität Karlsruhe, Schriftenreihe des Institut für Straßen- und Eisenbahnwesen, Heft 45, 1945
- [33] Jordan, W.; Smirnov: Besonderheiten der Formänderungen von Straßenkonstruktionen unter der Einwirkung von rollenden Kraftfahrzeugbelastungen, Die Straße, Heft 5/1973
- [34] Lamb, H.: On the Propagation of Tremors over the Surface of an Elastic Solid, Phil. Trans. Of the Royal Society of London, Series A, Vol. 203, 1904
- [35] Marguerre, K.: Spannungsverteilung und Wellenausbreitung in der kontinuierlich gestützten Platte, Ingenieur-Archiv 4, 1933
- [36] Meissner, R; Stegena, L.: Praxis der seismischen Feldmessung und Auswertung, Studienhefte zur Angewandten Geophysik, Gebrüder Borntraeger, Berlin/Stuttgart, 1977
- [37] Neidhart, T.: Lösung dreidimensionaler linearer Probleme der Bodendynamik mit der Randelementmethode, Veröffentlichungen des Institutes für Bodenmechanik und Felsmechanik der Universität Fridericiana in Karlsruhe, Heft 131, 1994
- [38] Neumann, H.-J.: Bitumen und seine Anwendung, Expert Verlag, Grafenau, 1981
- [39] Ulrich, E.: Elementare Festigkeitslehre, Verlag W. Girardet, Essen, 1967
- [40] Unterlagen der Fa. Phönix (FWD Hersteller), Vejen, Dänemark, 1997
- [41] Richart, Woods, Hall: Vibrations of Soils and Foundations, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N. J., 1970
- [42] Roos, R.; Freund, H.-J.; Thiele, T.: Erarbeitung eines Bewertungshintergrundes für Tragfähigkeitsmessungen auf Basis von Zustandsindikatoren nach JENDIA, Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Bundesministerium für Verkehr, Heft 989, 2008
- [43] RStO 01, Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaues von Verkehrsflächen, Ausgabe 2001, FGSV
- [44] RStO 12, Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaues von Verkehrsflächen, Ausgabe 2012, FGSV
- [45] Straube, E, Krass, K: Straßenbau und Straßenerhaltung: Ein Handbuch für Studium und Praxis, 8. Auflage, Erich Schmidt Verlag, Berlin, 2005
- [46] Straube, E: Wiederholungsmessungen an flexiblen Fahrbahnbefestigungen ehemaliger Untersuchungsstrecken, Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Bundesministerium für Verkehr, Heft 739, 1996
- [47] Tragfähigkeitsmessung mittels Fallgerät, Institut für Straßenbau, Verkehrstechnik und Städtebau, TH Kopenhagen, A. Bohn, Straße und Autobahn, Heft 1/1968

- [48] Triantafyllidis: Halbraumlösungen zur Behandlung bodendynamischer Probleme mit der Randelementmethode, Veröffentlichungen des Institutes für Bodenmechanik und Felsmechanik der Universität Fridericiana in Karlsruhe, Heft 116, 1989
- [49] Straube, E.: Zerstörungsfreie Ermittlung der Untergrundtragfähigkeit von Asphaltbefestigungen durch FWD Messungen, Veröffentlichung der Arbeitsgemeinschaft universitärer FWD Betreiber (AUF), Oktober 2008
- [50] Spiegel, M.R.: Laplace-Transformation (Theorie und Anwendung), McGraw-Hill Book Company GmbH, Düsseldorf/New York, 1977
- [51] Spiegel, M.R.: Höhere Mathematik für Ingenieure und Naturwissenschaftler (Theorie und Anwendung), McGraw-Hill Book Company GmbH, Hamburg/New York, 1978
- [52] Vrettos, C.: Oberflächenwellen im Halbraum mit tiefenabhängigem Schubmodul, Veröffentlichungen des Institutes für Bodenmechanik und Felsmechanik der Universität Fridericiana in Karlsruhe, Heft 114, 1988
- [53] ZTV E-StB 09, Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Erdarbeiten im Straßenbau, FGSV, 2009

Verzeichnis der Internetquellen

- [54] <http://de.wikipedia.org>: Wikimedia Foundation Inc.

Software

- [55] BISAR (Bitumen Structures Analysis in Roads), Version PC 9/92, Shell AG, 1992
- [56] MATLAB, Version R2011b, MathWorks, 2011

Anlage 1 Oberbaubereiche: Abweichung der Verschiebungsfaktoren

Oberbaubereich 1 (1000 - 2000 MN/m²)												
Abstand vom Lastzentrum = 1.800 cm												
Bettungs- modul [MN/m²]	Verschiebungsfaktoren				Abweichungen [-]				Abweichungen [%]			
	1000 MN/m²	2000 MN/m²	Lösungsansatz 1	Lösungsansatz 2	Lösungsansatz 1		Lösungsansatz 2		Lösungsansatz 1		Lösungsansatz 2	
150	1.3177	1.3205	1.31918	1.31916	-0.00141	0.00137	-0.00139	0.00139	-0.11%	0.10%	-0.11%	0.11%
200	1.72244	1.78453	1.77856	1.77848	-0.00612	0.00597	-0.00604	0.00604	-0.34%	0.34%	-0.34%	0.34%
250	2.22645	2.25188	2.23929	2.23916	-0.01285	0.01259	-0.01272	0.01272	-0.57%	0.56%	-0.57%	0.57%
300	2.68012	2.72098	2.70072	2.70055	-0.02060	0.02026	-0.02043	0.02043	-0.76%	0.75%	-0.76%	0.76%
350	3.13163	3.19016	3.16109	3.16089	-0.02946	0.02907	-0.02927	0.02927	-0.93%	0.92%	-0.93%	0.93%
400	3.58406	3.65887	3.62168	3.62147	-0.03762	0.03719	-0.03740	0.03740	-1.04%	1.03%	-1.03%	1.03%
450	4.03414	4.12909	4.08182	4.08162	-0.04768	0.04727	-0.04747	0.04747	-1.17%	1.16%	-1.16%	1.16%
500	4.48584	4.59872	4.54248	4.54228	-0.05664	0.05624	-0.05644	0.05644	-1.25%	1.24%	-1.24%	1.24%
									-0.77%	0.76%	-0.77%	0.77%
												Mittel
Abstand vom Lastzentrum = 0 cm												
150	1.13785	1.15447	1.14474	1.14616	-0.00690	0.00972	-0.00831	0.00831	-0.60%	0.85%	-0.72%	0.72%
200	1.29808	1.34105	1.31572	1.31956	-0.01765	0.02533	-0.02149	0.02149	-1.34%	1.93%	-1.63%	1.63%
250	1.42930	1.50000	1.45806	1.46465	-0.02876	0.04194	-0.03535	0.03535	-1.97%	2.88%	-2.41%	2.41%
300	1.53917	1.63785	1.57898	1.58851	-0.03981	0.05886	-0.04934	0.04934	-2.52%	3.73%	-3.11%	3.11%
350	1.63349	1.75935	1.68390	1.69642	-0.05041	0.07544	-0.06293	0.06293	-2.99%	4.48%	-3.71%	3.71%
400	1.71587	1.86849	1.77660	1.79218	-0.06073	0.09189	-0.07631	0.07631	-3.42%	5.17%	-4.26%	4.26%
450	1.78846	1.96734	1.85921	1.87790	-0.07075	0.10813	-0.08944	0.08944	-3.81%	5.82%	-4.76%	4.76%
500	1.85259	2.05738	1.93312	1.95498	-0.08053	0.12426	-0.10239	0.10239	-4.17%	6.43%	-5.24%	5.24%
									-2.60%	3.91%	-3.23%	3.23%
												Mittel
Oberbaubereich 2 (2000 - 4000 MN/m²)												
Abstand vom Lastzentrum = 1.800 cm												
Bettungs- modul [MN/m²]	Verschiebungsfaktoren				Abweichungen [-]				Abweichungen [%]			
	2000 MN/m²	4000 MN/m²	Lösungsansatz 1	Lösungsansatz 2	Lösungsansatz 1		Lösungsansatz 2		Lösungsansatz 1		Lösungsansatz 2	
150	1.32055	1.31320	1.31682	1.31688	0.00373	-0.00362	0.00367	-0.00367	0.28%	-0.27%	0.28%	-0.28%
200	1.78453	1.77017	1.77724	1.77735	0.00729	-0.00706	0.00718	-0.00718	0.41%	-0.40%	0.40%	-0.40%
250	2.25188	2.23499	2.24330	2.24343	0.00858	-0.00831	0.00844	-0.00844	0.38%	-0.37%	0.38%	-0.38%
300	2.72098	2.70495	2.71285	2.71297	0.00813	-0.00790	0.00801	-0.00801	0.30%	-0.29%	0.30%	-0.30%
350	3.19016	3.17853	3.18426	3.18434	0.00590	-0.00574	0.00582	-0.00582	0.19%	-0.18%	0.18%	-0.18%
400	3.65887	3.65625	3.65754	3.65756	0.00133	-0.00129	0.00131	-0.00131	0.04%	-0.04%	0.04%	-0.04%
450	4.12909	4.13404	4.13159	4.13157	-0.00251	0.00245	-0.00248	0.00248	-0.06%	0.06%	-0.06%	0.06%
500	4.59872	4.61264	4.60575	4.60568	-0.00703	0.00689	-0.00696	0.00696	-0.15%	0.15%	-0.15%	0.15%
									0.17%	-0.17%	0.17%	-0.17%
												Mittel
Abstand vom Lastzentrum = 0 cm												
150	1.15447	1.16710	1.15981	1.16078	-0.00535	0.00729	-0.00632	0.00632	-0.46%	0.63%	-0.54%	0.54%
200	1.34105	1.37369	1.35476	1.35737	-0.01371	0.01893	-0.01632	0.01632	-1.01%	1.40%	-1.20%	1.20%
250	1.50000	1.55316	1.52219	1.52658	-0.02219	0.03097	-0.02658	0.02658	-1.46%	2.03%	-1.74%	1.74%
300	1.63785	1.71396	1.66942	1.67590	-0.03158	0.04453	-0.03806	0.03806	-1.89%	2.67%	-2.27%	2.27%
350	1.75935	1.85786	1.80000	1.80860	-0.04065	0.05786	-0.04925	0.04925	-2.26%	3.21%	-2.72%	2.72%
400	1.86849	1.99020	1.91846	1.92935	-0.04998	0.07174	-0.06086	0.06086	-2.61%	3.74%	-3.15%	3.15%
450	1.96734	2.11248	2.02665	2.03991	-0.05931	0.08583	-0.07257	0.07257	-2.93%	4.23%	-3.56%	3.56%
500	2.05738	2.22610	2.12601	2.14174	-0.06864	0.10008	-0.08436	0.08436	-3.23%	4.71%	-3.94%	3.94%
									-1.98%	2.83%	-2.39%	2.39%
												Mittel
Oberbaubereich 3 (4000 - 8000 MN/m²)												
Abstand vom Lastzentrum = 1.800 cm												
Bettungs- modul [MN/m²]	Verschiebungsfaktoren				Abweichungen [-]				Abweichungen [%]			
	4000 MN/m²	8000 MN/m²	Lösungsansatz 1	Lösungsansatz 2	Lösungsansatz 1		Lösungsansatz 2		Lösungsansatz 1		Lösungsansatz 2	
150	1.31320	1.29724	1.30519	1.30522	0.00801	-0.00794	0.00798	-0.00798	0.61%	-0.61%	0.61%	-0.61%
200	1.77017	1.72946	1.74961	1.74981	0.02056	-0.02016	0.02036	-0.02036	1.18%	-1.15%	1.16%	-1.16%
250	2.23499	2.16987	2.20201	2.20243	0.03299	-0.03214	0.03256	-0.03256	1.50%	-1.46%	1.48%	-1.48%
300	2.70495	2.61761	2.66064	2.66128	0.04431	-0.04303	0.04367	-0.04367	1.67%	-1.62%	1.64%	-1.64%
350	3.17853	3.07065	3.12375	3.12459	0.05477	-0.05310	0.05394	-0.05394	1.75%	-1.70%	1.73%	-1.73%
400	3.65625	3.52786	3.59102	3.59205	0.06523	-0.06316	0.06420	-0.06420	1.82%	-1.76%	1.79%	-1.79%
450	4.13404	3.98968	4.06071	4.06186	0.07334	-0.07103	0.07218	-0.07218	1.81%	-1.75%	1.78%	-1.78%
500	4.61264	4.45421	4.53218	4.53343	0.08046	-0.07797	0.07921	-0.07921	1.78%	-1.72%	1.75%	-1.75%
									1.51%	-1.47%	1.49%	-1.49%
												Mittel
Abstand vom Lastzentrum = 0 cm												
150	1.16710	1.17557	1.17074	1.17134	-0.00364	0.00483	-0.00424	0.00424	-0.31%	0.41%	-0.36%	0.36%
200	1.37369	1.39654	1.38345	1.38512	-0.00976	0.01309	-0.01142	0.01142	-0.71%	0.95%	-0.82%	0.82%
250	1.55316	1.59211	1.56972	1.57263	-0.01655	0.02239	-0.01947	0.01947	-1.05%	1.43%	-1.24%	1.24%
300	1.71396	1.76882	1.73719	1.74139	-0.02323	0.03163	-0.02743	0.02743	-1.34%	1.82%	-1.58%	1.58%
350	1.85786	1.93136	1.88885	1.89461	-0.03100	0.04251	-0.03675	0.03675	-1.64%	2.25%	-1.94%	1.94%
400	1.99020	2.08185	2.02871	2.03603	-0.03850	0.05314	-0.04582	0.04582	-1.90%	2.62%	-2.25%	2.25%
450	2.11248	2.22515	2.15855	2.16750	-0.04608	0.06396	-0.05502	0.05502	-2.13%	2.96%	-2.54%	2.54%
500	2.22610	2.35441	2.27966	2.29025	-0.05357	0.07475	-0.06416	0.06416	-2.35%	3.28%	-2.80%	2.80%
									-1.43%	1.96%	-1.69%	1.69%
												Mittel
Oberbaubereich 4 (8000 - 15000 MN/m²)												
Abstand vom Lastzentrum = 1.800 cm												
Bettungs- modul [MN/m²]	Verschiebungsfaktoren				Abweichungen [-]				Abweichungen [%]			
	8000 MN/m²	15000 MN/m²	Lösungsansatz 1	Lösungsansatz 2	Lösungsansatz 1		Lösungsansatz 2		Lösungsansatz 1		Lösungsansatz 2	
150	1.29724	1.27921	1.28833	1.28823	0.00892	-0.00912	0.00902	-0.00902	0.69%	-0.71%	0.70%	-0.70%
200	1.72946	1.68162	1.70564	1.70554	0.02382	-0.02402	0.02392	-0.02392	1.40%	-1.41%	1.40%	-1.40%
250	2.16987	2.08876	2.12928	2.12932	0.04059	-0.04052	0.04055	-0.04055	1.91%	-1.90%	1.90%	-1.90%
300	2.61761	2.50018	2.55861	2.55889	0.05900	-0.05843	0.05871	-0.05871	2.31%	-2.28%	2.29%	-2.29%
350	3.07065	2.91722	2.99336	2.99393	0.07729	-0.07615	0.07672	-0.07672	2.58%	-2.54%	2.56%	-2.56%
400	3.52786	3.37899	3.43197	3.43287	0.09589	-0.09408	0.09498	-0.09498	2.79%	-2.74%	2.77%	-2.77%
450	3.98968	3.76355	3.87537	3.87661	0.11431	-0.11182	0.11307	-0.11307	2.95%	-2.89%	2.92%	-2.92%
500	4.45421	4.19112	4.32105	4.32267	0.13316	-0.12993	0.13155	-0.13155	3.08%	-3.01%	3.04%	-3.04%
									2.21%	-2.18%	2.20%	-2.20%
												Mittel
Abstand vom Lastzentrum = 0 cm												
150	1.17557	1.18126	1.17807	1.17841	-0.00350	0.00318	-0.00284	0.00284	-0.21%	0.27%	-0.24%	0.24%
200	1.39654	1.41167	1.40317	1.40410	-0.00663	0.00850	-0.00756	0.00756	-0.47%	0.61%	-0.54%	0.54%
250	1.59211	1.61802	1.60343	1.60506	-0.01132	0.01459	-0.01296	0.01296	-0.71%	0.91%	-0.81%	0.81%
300	1.76882	1.80663	1.78529	1.78772	-0.01647	0.02133	-0.01890	0.01890	-0.92%	1.19%	-1.06%	1.06%
350	1.93136	1.98131	1.95307	1.95634	-0.02171	0.02824	-0.02497	0.02497	-1.11%	1.45%	-1.28%	1.28%
400	2.08185	2.14481	2.10915	2.11333	-0.02730	0.03566	-0.03148	0.03148	-1.29%	1.69%	-1.49%	1.49%
450	2.22515	2.29830	2.25530	2.26041	-0.03279	0.04299	-0.03789	0.03789	-1.45%	1.91%	-1.68%	1.68%
500	2.35441	2.44375	2.39299	2.39908	-0.03857	0.05077	-0.04467	0.04467	-1.61%	2.12%	-1.86%	1.86%
									-0.97%	1.27%	-1.12%	1.12%
												Mittel
Oberbaubereich 5 (15000 - 25000 MN/m²)												
Abstand vom Lastzentrum = 1.800 cm												
Bettungs- modul [MN/m²]	Verschiebungsfaktoren				Abweichungen [-]				Abweichungen [%]			
	15000 MN/m²	25000 MN/m²	Lösungsansatz 1	Lösungsansatz 2	Lösungsansatz 1		Lösungsansatz 2		Lösungsansatz 1		Lösungsansatz 2	
150	1.27921	1.26517	1.27234	1.27219	0.00687	-0.00717	0.00702	-0.00702	0.54%	-0.56%	0.55%	-0.55%
200	1.68162	1.64253	1.66237	1.66207	0.01925	-0.01925	0.01955	-0.01955	1.16%	-1.19%	1.18%	-1.18%
250	2.08876	2.02077	2.05512	2.05477	0.03365	-0.03435	0.03400	-0.03400	1.64%	-1.67%	1.65%	-1.65%
300	2.50018	2.40093	2.45088	2.45055	0.04930	-0.04995	0.04962	-0.04962	2.01%	-2.04%	2.02%	-2.02%
350	2.91722	2.78432										

Anlage 2 Oberbaubereichstafeln

Oberbereichstafel 1 (Deflexion am Geofonabstand 1800mm: 0,069 - 0,057 mm)									
Grenze zwischen Oberbau- bereich	Deflexion [mm] am Geofonabstand [mm]:								
	0	200	300	450	600	900	1200	1500	1800
1	0,39850	0,27810	0,23860	0,20120	0,17200	0,12770	0,09754	0,07700	0,06287
1 / 2	0,28530	0,22300	0,20090	0,17760	0,15750	0,12390	0,09817	0,07901	0,06487
2 / 3	0,21090	0,17880	0,16650	0,15250	0,13940	0,11580	0,09581	0,07956	0,06661
3 / 4	0,15950	0,14290	0,13630	0,12800	0,12000	0,10430	0,09002	0,07745	0,06669
4 / 5	0,12550	0,11650	0,11270	0,10770	0,10270	0,09236	0,08236	0,07306	0,06465
5	0,10400	0,09851	0,09612	0,09287	0,08947	0,08232	0,07508	0,06809	0,06152
Oberbereichstafel 2 (Deflexion am Geofonabstand 1800mm: 0,056 - 0,043 mm)									
Grenze zwischen Oberbau- bereich	Deflexion [mm] am Geofonabstand [mm]:								
	0	200	300	450	600	900	1200	1500	1800
1	0,35180	0,23290	0,19510	0,16110	0,13560	0,09862	0,07452	0,05864	0,04794
1 / 2	0,24810	0,18660	0,16530	0,14380	0,12580	0,09685	0,07560	0,06029	0,04932
2 / 3	0,18130	0,14960	0,13780	0,12470	0,11280	0,09182	0,07475	0,06128	0,05086
3 / 4	0,13610	0,11980	0,11330	0,10550	0,09803	0,08386	0,07127	0,06049	0,05151
4 / 5	0,10660	0,09765	0,09394	0,08921	0,08448	0,07501	0,06602	0,05784	0,05061
5	0,08809	0,08263	0,08028	0,07717	0,07397	0,06732	0,06072	0,05447	0,04870
Oberbereichstafel 3 (Deflexion am Geofonabstand 1800mm: 0,042 - 0,029 mm)									
Grenze zwischen Oberbau- bereich	Deflexion [mm] am Geofonabstand [mm]:								
	0	200	300	450	600	900	1200	1500	1800
1	0,30050	0,18370	0,14820	0,11850	0,09758	0,06915	0,05171	0,04066	0,03335
1 / 2	0,20700	0,14660	0,12660	0,10740	0,09218	0,06890	0,05281	0,04175	0,03408
2 / 3	0,14880	0,11760	0,10640	0,09445	0,08408	0,06656	0,05300	0,04278	0,03519
3 / 4	0,11030	0,09423	0,08805	0,08087	0,07419	0,06195	0,05152	0,04295	0,03606
4 / 5	0,08574	0,07692	0,07335	0,06895	0,06464	0,05626	0,04857	0,04182	0,03603
5	0,07053	0,06513	0,06287	0,05995	0,05700	0,05102	0,04526	0,03996	0,03520
Oberbereichstafel 4 (Deflexion am Geofonabstand 1800mm: 0,028 - 0,016 mm)									
Grenze zwischen Oberbau- bereich	Deflexion [mm] am Geofonabstand [mm]:								
	0	200	300	450	600	900	1200	1500	1800
1	0,24570	0,13160	0,09919	0,07497	0,05976	0,04102	0,03047	0,02405	0,01985
1 / 2	0,16260	0,10370	0,08537	0,06942	0,05782	0,04151	0,03119	0,02452	0,02008
2 / 3	0,11340	0,08295	0,07263	0,06242	0,05413	0,04107	0,03176	0,02521	0,02059
3 / 4	0,08227	0,06654	0,06079	0,05450	0,04893	0,03930	0,03165	0,02574	0,02126
4 / 5	0,06304	0,05440	0,05106	0,04712	0,04342	0,03656	0,03062	0,02568	0,02166
5	0,05142	0,04612	0,04399	0,04134	0,03876	0,03373	0,02912	0,02507	0,02160

Anlage 3 Verschiebungsfaktoren Tafeln

Verschiebungsfaktoren für Oberbaubereich 1										
Bettungs- modul E_0 [MN/m ²]	Einsenkung am letzten Geofon D_{1800} [mm]	Abstand zum Lastzentrum [mm]								
		0	200	300	450	600	900	1200	1500	1800
115	0,0708	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000
120	0,0678	1,02234	1,02959	1,03245	1,03547	1,03751	1,04102	1,04392	1,04492	1,04538
125	0,0649	1,04419	1,05844	1,06444	1,07078	1,07504	1,08258	1,08770	1,08993	1,09085
130	0,0623	1,06570	1,08721	1,09619	1,10558	1,11230	1,12393	1,13158	1,13509	1,13643
135	0,0599	1,08649	1,11550	1,12802	1,14052	1,14966	1,16513	1,17549	1,18028	1,18204
140	0,0577	1,10685	1,14333	1,15946	1,17539	1,18726	1,20630	1,21950	1,22565	1,22772
145	0,0556	1,12681	1,17079	1,19061	1,20997	1,22448	1,24822	1,26361	1,27098	1,27340
150	0,0537	1,14616	1,19828	1,22163	1,24437	1,26187	1,28955	1,30785	1,31648	1,31916
155	0,0519	1,16508	1,22513	1,25195	1,27878	1,29883	1,33114	1,35217	1,36202	1,36491
160	0,0502	1,18384	1,25203	1,28278	1,31309	1,33602	1,37272	1,39653	1,40761	1,41070
165	0,0486	1,20181	1,27829	1,31337	1,34706	1,37329	1,41443	1,44091	1,45341	1,45668
170	0,0471	1,21991	1,30445	1,34314	1,38146	1,41049	1,45615	1,48544	1,49904	1,50256
175	0,0457	1,23732	1,33067	1,37349	1,41570	1,44802	1,49788	1,53000	1,54486	1,54854
180	0,0444	1,25426	1,35626	1,40319	1,44914	1,48513	1,53976	1,57467	1,59064	1,59454
185	0,0432	1,27129	1,38142	1,43292	1,48312	1,52162	1,58160	1,61935	1,63657	1,64051
190	0,0420	1,28784	1,40644	1,46253	1,51703	1,55859	1,62349	1,66421	1,68244	1,68640
195	0,0409	1,30385	1,43162	1,49201	1,55022	1,59601	1,66545	1,70906	1,72854	1,73238
200	0,0398	1,31956	1,45655	1,52073	1,58426	1,63226	1,70753	1,75396	1,77450	1,77848
205	0,0388	1,33546	1,48071	1,55011	1,61794	1,66945	1,74945	1,79889	1,82066	1,82451
210	0,0379	1,35090	1,50521	1,57902	1,65175	1,70674	1,79164	1,84382	1,86667	1,87077
215	0,0370	1,36564	1,52926	1,60800	1,68494	1,74346	1,83383	1,88908	1,91273	1,91683
220	0,0361	1,38048	1,55328	1,63632	1,71801	1,78072	1,87602	1,93401	1,95912	1,96277
225	0,0353	1,39510	1,57702	1,66566	1,75096	1,81714	1,91820	1,97914	2,00526	2,00897
230	0,0345	1,40945	1,60010	1,69362	1,78520	1,85439	1,96051	2,02452	2,05142	2,05471
235	0,0337	1,42388	1,62386	1,72195	1,81757	1,89142	2,00284	2,06966	2,09747	2,10103
240	0,0330	1,43741	1,64687	1,74995	1,85114	1,92830	2,04522	2,11520	2,14404	2,14720
245	0,0323	1,45120	1,66994	1,77824	1,88424	1,96524	2,08755	2,16063	2,19050	2,19306
250	0,0316	1,46465	1,69259	1,80673	1,91676	2,00218	2,13001	2,20580	2,23670	2,23916
255	0,0310	1,47772	1,71538	1,83471	1,95041	2,03903	2,17236	2,25125	2,28307	2,28540
260	0,0304	1,49078	1,73764	1,86209	1,98301	2,07606	2,21502	2,29667	2,32922	2,33166
265	0,0298	1,50367	1,75997	1,88960	2,01677	2,11296	2,25752	2,34243	2,37564	2,37743
270	0,0292	1,51653	1,78221	1,91721	2,04917	2,14979	2,30036	2,38768	2,42224	2,42380
275	0,0287	1,52894	1,80379	1,94391	2,08209	2,18685	2,34287	2,43362	2,46859	2,46943
280	0,0282	1,54087	1,82590	1,97226	2,11446	2,22384	2,38553	2,47909	2,51492	2,51591
285	0,0276	1,55299	1,84798	1,99974	2,14773	2,26068	2,42828	2,52480	2,56150	2,56233
290	0,0272	1,56503	1,86929	2,02625	2,18045	2,29758	2,47104	2,57040	2,60788	2,60808
295	0,0267	1,57682	1,89110	2,05348	2,21323	2,33465	2,51397	2,61610	2,65433	2,65451
300	0,0262	1,58851	1,91204	2,08059	2,24602	2,37152	2,55675	2,66214	2,70077	2,70055
305	0,0258	1,59992	1,93344	2,10741	2,27866	2,40844	2,59955	2,70780	2,74756	2,74663
310	0,0254	1,61120	1,95389	2,13404	2,31136	2,44553	2,64255	2,75364	2,79420	2,79265
315	0,0250	1,62265	1,97478	2,16134	2,34381	2,48241	2,68516	2,79925	2,84104	2,83853
320	0,0246	1,63350	1,99545	2,18732	2,37649	2,51936	2,72836	2,84527	2,88707	2,88477
325	0,0242	1,64448	2,01570	2,21469	2,40897	2,55633	2,77103	2,89129	2,93361	2,93072
330	0,0238	1,65514	2,03725	2,24052	2,44163	2,59327	2,81448	2,93723	2,98066	2,97691
335	0,0234	1,66562	2,05676	2,26763	2,47413	2,63034	2,85724	2,98300	3,02658	3,02328
340	0,0231	1,67593	2,07757	2,29401	2,50644	2,66729	2,90041	3,02893	3,07340	3,06913
345	0,0227	1,68668	2,09786	2,31957	2,53899	2,70428	2,94334	3,07500	3,11999	3,11502
350	0,0224	1,69642	2,11781	2,34643	2,57142	2,74125	2,98691	3,12070	3,16686	3,16089
355	0,0221	1,70659	2,13718	2,37254	2,60387	2,77818	3,02979	3,16684	3,21337	3,20741
360	0,0218	1,71657	2,15712	2,39771	2,63630	2,81546	3,07324	3,21293	3,26004	3,25382
365	0,0215	1,72666	2,17643	2,42432	2,66850	2,85238	3,11656	3,25891	3,30681	3,29928
370	0,0212	1,73633	2,19609	2,45006	2,70098	2,88936	3,15966	3,30522	3,35299	3,34604
375	0,0209	1,74578	2,21611	2,47608	2,73316	2,92660	3,20285	3,35182	3,39982	3,39171
380	0,0206	1,75533	2,23460	2,50223	2,76555	2,96358	3,24610	3,39762	3,44659	3,43779
385	0,0203	1,76499	2,25341	2,52738	2,79778	3,00050	3,28976	3,44359	3,49326	3,48430
390	0,0201	1,77419	2,27253	2,55303	2,82998	3,03759	3,33299	3,48970	3,53976	3,53032
395	0,0198	1,78314	2,29199	2,57848	2,86233	3,07455	3,37656	3,53590	3,58676	3,57577
400	0,0196	1,79218	2,31090	2,60402	2,89442	3,11189	3,42000	3,58216	3,63274	3,62147
405	0,0193	1,80131	2,32896	2,62949	2,92660	3,14902	3,46328	3,62842	3,67992	3,66741
410	0,0191	1,81018	2,34849	2,65486	2,95887	3,18594	3,50721	3,67464	3,72673	3,71453
415	0,0188	1,81890	2,36703	2,67997	2,99098	3,22314	3,55044	3,72078	3,77310	3,75987
420	0,0186	1,82794	2,38587	2,70525	3,02314	3,26034	3,59382	3,76809	3,82063	3,80532
425	0,0184	1,83647	2,40393	2,73038	3,05531	3,29719	3,63781	3,81392	3,86592	3,85189
430	0,0182	1,84508	2,42214	2,75551	3,08748	3,33457	3,68141	3,85951	3,91407	3,89852
435	0,0180	1,85277	2,44038	2,78060	3,11938	3,37187	3,72457	3,90620	3,95980	3,94301
440	0,0178	1,86116	2,45864	2,80550	3,15147	3,40903	3,76822	3,95259	4,00661	3,98965
445	0,0176	1,87000	2,47717	2,83051	3,18348	3,44604	3,81186	3,99937	4,05359	4,03626
450	0,0174	1,87790	2,49456	2,85544	3,21565	3,48316	3,85545	4,04572	4,10071	4,08162
455	0,0172	1,88549	2,51219	2,88014	3,24744	3,52076	3,89951	4,09165	4,14695	4,12679
460	0,0170	1,89352	2,52980	2,90488	3,27961	3,55777	3,94343	4,13859	4,19424	4,17422
465	0,0168	1,90163	2,54739	2,92971	3,31136	3,59485	3,98724	4,18504	4,24054	4,21897
470	0,0166	1,90941	2,56522	2,95422	3,34345	3,63233	4,03082	4,23170	4,28682	4,26598
475	0,0164	1,91726	2,58301	2,97878	3,37534	3,66949	4,07420	4,27772	4,33303	4,31141
480	0,0163	1,92517	2,59995	3,00336	3,40728	3,70663	4,11789	4,32390	4,38024	4,35784
485	0,0161	1,93247	2,61793	3,02778	3,43925	3,74376	4,16252	4,37019	4,42737	4,40389
490	0,0159	1,94051	2,63488	3,05220	3,47124	3,78125	4,20624	4,41748	4,47436	4,44954
495	0,0158	1,94752	2,65191	3,07640	3,50323	3,81868	4,24953	4,46396	4,51999	4,49472
>=500	<0,0158	1,95498	2,66900	3,10080	3,53521	3,85602	4,29442	4,51051	4,56777	4,54228

Anlage 3 Verschiebungsfaktoren Tafeln

Verschiebungsfaktoren für Oberbaubereich 2										
Bettungs- modul E_0 [MN/m²]	Einsenkung am letzten Geofon D_{1800} [mm]	Abstand zum Lastzentrum [mm]								
		0	200	300	450	600	900	1200	1500	1800
115	0,0728	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000
120	0,0697	1,02434	1,02942	1,03126	1,03355	1,03564	1,03840	1,04197	1,04361	1,04491
125	0,0668	1,04817	1,05832	1,06229	1,06721	1,07104	1,07765	1,08338	1,08733	1,08994
130	0,0642	1,07187	1,08692	1,09313	1,10008	1,10630	1,11667	1,12513	1,13122	1,13513
135	0,0617	1,09479	1,11541	1,12387	1,13325	1,14110	1,15555	1,16696	1,17516	1,18039
140	0,0594	1,11705	1,14330	1,15404	1,16618	1,17648	1,19396	1,20887	1,21925	1,22579
145	0,0573	1,13921	1,17069	1,18412	1,19908	1,21137	1,23328	1,25081	1,26339	1,27125
150	0,0553	1,16078	1,19807	1,21430	1,23132	1,24601	1,27176	1,29287	1,30772	1,31688
155	0,0535	1,18178	1,22542	1,24375	1,26360	1,28064	1,31042	1,33501	1,35204	1,36258
160	0,0517	1,20274	1,25216	1,27293	1,29566	1,31509	1,34955	1,37714	1,39656	1,40829
165	0,0501	1,22339	1,27864	1,30273	1,32747	1,34977	1,38830	1,41928	1,44114	1,45426
170	0,0486	1,24346	1,30501	1,33124	1,35984	1,38395	1,42716	1,46167	1,48576	1,50024
175	0,0471	1,26331	1,33083	1,36007	1,39164	1,41864	1,46605	1,50391	1,53055	1,54626
180	0,0457	1,28225	1,35691	1,38875	1,42328	1,45318	1,50486	1,54642	1,57528	1,59240
185	0,0445	1,30177	1,38223	1,41764	1,45520	1,48669	1,54379	1,58880	1,62016	1,63861
190	0,0432	1,32053	1,40759	1,44562	1,48609	1,52108	1,58258	1,63145	1,66513	1,68466
195	0,0421	1,33884	1,43292	1,47421	1,51772	1,55570	1,62157	1,67408	1,71017	1,73110
200	0,0410	1,35737	1,45763	1,50166	1,54865	1,58909	1,66053	1,71664	1,75523	1,77735
205	0,0399	1,37556	1,48228	1,53015	1,58021	1,62318	1,69941	1,75940	1,80052	1,82385
210	0,0389	1,39316	1,50670	1,55726	1,61161	1,65714	1,73832	1,80220	1,84567	1,87045
215	0,0380	1,41058	1,53146	1,58535	1,64277	1,69131	1,77736	1,84507	1,89089	1,91697
220	0,0371	1,42798	1,55577	1,61253	1,67266	1,72517	1,81631	1,88784	1,93646	1,96321
225	0,0362	1,44499	1,57983	1,63992	1,70349	1,75907	1,85543	1,93073	1,98181	2,01006
230	0,0354	1,46157	1,60342	1,66695	1,73477	1,79273	1,89448	1,97396	2,02722	2,05631
235	0,0346	1,47854	1,62705	1,69410	1,76509	1,82657	1,93350	2,01688	2,07279	2,10321
240	0,0339	1,49468	1,65080	1,72063	1,79591	1,86032	1,97253	2,06012	2,11841	2,15008
245	0,0332	1,51064	1,67394	1,74801	1,82635	1,89389	2,01162	2,10318	2,16421	2,19643
250	0,0325	1,52658	1,69713	1,77553	1,85640	1,92765	2,05085	2,14635	2,20980	2,24343
255	0,0318	1,54248	1,72020	1,80138	1,88694	1,96122	2,08996	2,18975	2,25561	2,29033
260	0,0312	1,55758	1,74248	1,82776	1,91756	1,99485	2,12905	2,23283	2,30094	2,33737
265	0,0306	1,57317	1,76615	1,85417	1,94783	2,02839	2,16836	2,27644	2,34686	2,38403
270	0,0300	1,58848	1,78814	1,88107	1,97808	2,06189	2,20766	2,31950	2,39270	2,43097
275	0,0294	1,60309	1,81084	1,90653	2,00827	2,09542	2,24668	2,36318	2,43900	2,47768
280	0,0289	1,61816	1,83238	1,93317	2,03822	2,12893	2,28611	2,40637	2,48465	2,52491
285	0,0283	1,63227	1,85533	1,95924	2,06837	2,16238	2,32550	2,45003	2,53096	2,57216
290	0,0278	1,64727	1,87720	1,98466	2,09831	2,19584	2,36477	2,49385	2,57675	2,61885
295	0,0273	1,66146	1,89959	2,01053	2,12837	2,22928	2,40407	2,53715	2,62265	2,66630
300	0,0269	1,67590	1,92127	2,03662	2,15825	2,26280	2,44356	2,58104	2,66898	2,71297
305	0,0264	1,68947	1,94306	2,06193	2,18805	2,29603	2,48295	2,62454	2,71532	2,76025
310	0,0260	1,70327	1,96433	2,08764	2,21786	2,32958	2,52218	2,66820	2,76154	2,80705
315	0,0255	1,71729	1,98576	2,11363	2,24764	2,36291	2,56141	2,71195	2,80757	2,85434
320	0,0251	1,73037	2,00725	2,13882	2,27736	2,39614	2,60111	2,75574	2,85374	2,90152
325	0,0247	1,74437	2,02823	2,16414	2,30698	2,42940	2,64045	2,79985	2,90004	2,94849
330	0,0243	1,75738	2,05011	2,18944	2,33677	2,46285	2,68018	2,84351	2,94637	2,99578
335	0,0239	1,76985	2,07054	2,21473	2,36624	2,49626	2,71944	2,88738	2,99266	3,04333
340	0,0236	1,78324	2,09185	2,23984	2,39582	2,52940	2,75898	2,93142	3,03885	3,09046
345	0,0232	1,79609	2,11255	2,26489	2,42533	2,56262	2,79850	2,97556	3,08541	3,13703
350	0,0229	1,80860	2,13330	2,28984	2,45489	2,59609	2,83855	3,01935	3,13229	3,18434
355	0,0225	1,82129	2,15338	2,31480	2,48431	2,62916	2,87786	3,06314	3,17832	3,23237
360	0,0222	1,83416	2,17445	2,33962	2,51374	2,66265	2,91763	3,10775	3,22510	3,27967
365	0,0219	1,84641	2,19468	2,36441	2,54298	2,69587	2,95751	3,15182	3,27147	3,32608
370	0,0216	1,85828	2,21516	2,38915	2,57253	2,72901	2,99678	3,19573	3,31793	3,37385
375	0,0213	1,87114	2,23564	2,41382	2,60183	2,76225	3,03675	3,24038	3,36444	3,42138
380	0,0210	1,88249	2,25530	2,43841	2,63102	2,79535	3,07636	3,28427	3,41094	3,46861
385	0,0207	1,89484	2,27503	2,46290	2,66028	2,82876	3,11627	3,32832	3,45738	3,51549
390	0,0204	1,90678	2,29498	2,48740	2,68939	2,86196	3,15571	3,37251	3,50370	3,56364
395	0,0202	1,91799	2,31500	2,51177	2,71873	2,89490	3,19576	3,41679	3,55127	3,61044
400	0,0199	1,92935	2,33509	2,53612	2,74786	2,92808	3,23566	3,46113	3,59720	3,65756
405	0,0197	1,94083	2,35422	2,56045	2,77699	2,96148	3,27532	3,50548	3,64433	3,70500
410	0,0194	1,95246	2,37470	2,58476	2,80607	2,99454	3,31556	3,54980	3,69116	3,75272
415	0,0192	1,96362	2,39392	2,60884	2,83509	3,02778	3,35509	3,59405	3,73761	3,79969
420	0,0189	1,97553	2,41330	2,63302	2,86426	3,06118	3,39511	3,63941	3,78445	3,84684
425	0,0187	1,98602	2,43272	2,65693	2,89309	3,09414	3,43520	3,68338	3,83076	3,89415
430	0,0185	1,99758	2,45201	2,68092	2,92228	3,12751	3,47533	3,72776	3,87826	3,94156
435	0,0183	2,00768	2,47119	2,70479	2,95108	3,16037	3,51497	3,77258	3,92514	3,98903
440	0,0180	2,01852	2,49026	2,72872	2,97995	3,19361	3,55506	3,81712	3,97142	4,03655
445	0,0178	2,02948	2,50946	2,75268	3,00889	3,22658	3,59509	3,86133	4,01786	4,08408
450	0,0176	2,03991	2,52822	2,77649	3,03788	3,25992	3,63503	3,90657	4,06539	4,13157
455	0,0174	2,05045	2,54726	2,80032	3,06691	3,29327	3,67483	3,95067	4,11213	4,17777
460	0,0172	2,06110	2,56597	2,82397	3,09569	3,32629	3,71551	3,99583	4,15900	4,22625
465	0,0170	2,07084	2,58468	2,84758	3,12447	3,35927	3,75547	4,04044	4,20591	4,27334
470	0,0169	2,08171	2,60349	2,87119	3,15323	3,39256	3,79577	4,08531	4,25284	4,32152
475	0,0167	2,09164	2,62192	2,89477	3,18195	3,42542	3,83524	4,12958	4,29979	4,36815
480	0,0165	2,10273	2,64062	2,91831	3,21092	3,45892	3,87554	4,17398	4,34674	4,41582
485	0,0163	2,11217	2,65910	2,94179	3,23953	3,49194	3,91613	4,21855	4,39359	4,46316
490	0,0162	2,12240	2,67732	2,96520	3,26835	3,52522	3,95576	4,26407	4,44037	4,51015
495	0,0160	2,13202	2,69564	2,98833	3,29709	3,55835	3,99621	4,30885	4,48698	4,55670
>=500	<0,016	2,14174	2,71406	3,01181	3,32571	3,59132	4,03689	4,35365	4,53458	4,60568

Verschiebungsfaktoren für Oberbaubereich 3										
Bettungs- modul E_0 [MN/m ²]	Einsenkung am letzten Geofon D_{1800} [mm]	Abstand zum Lastzentrum [mm]								
		0	200	300	450	600	900	1200	1500	1800
115	0,0736	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000
120	0,0705	1,02564	1,02935	1,03044	1,03206	1,03384	1,03633	1,03927	1,04149	1,04324
125	0,0677	1,05098	1,05812	1,06068	1,06439	1,06765	1,07296	1,07832	1,08302	1,08661
130	0,0651	1,07606	1,08654	1,09053	1,09559	1,10114	1,10971	1,11746	1,12456	1,13018
135	0,0627	1,10057	1,11465	1,12062	1,12745	1,13359	1,14583	1,15672	1,16626	1,17372
140	0,0604	1,12425	1,14280	1,14995	1,15852	1,16704	1,18172	1,19589	1,20795	1,21742
145	0,0583	1,14800	1,16999	1,17913	1,18997	1,19942	1,21816	1,23517	1,24974	1,26125
150	0,0564	1,17134	1,19729	1,20800	1,22073	1,23205	1,25413	1,27441	1,29172	1,30522
155	0,0545	1,19385	1,22452	1,23695	1,25152	1,26482	1,29026	1,31367	1,33363	1,34927
160	0,0528	1,21647	1,25076	1,26487	1,28179	1,29697	1,32618	1,35291	1,37572	1,39336
165	0,0512	1,23872	1,27718	1,29351	1,31179	1,32933	1,36215	1,39208	1,41775	1,43760
170	0,0497	1,26026	1,30331	1,32141	1,34203	1,36125	1,39800	1,43147	1,45996	1,48191
175	0,0482	1,28171	1,32902	1,34879	1,37186	1,39334	1,43390	1,47071	1,50214	1,52634
180	0,0468	1,30265	1,35516	1,37680	1,40195	1,42546	1,46962	1,51015	1,54447	1,57083
185	0,0456	1,32376	1,38073	1,40409	1,43187	1,45685	1,50546	1,54939	1,58678	1,61551
190	0,0443	1,34422	1,40612	1,43133	1,46109	1,48898	1,54111	1,58887	1,62917	1,66017
195	0,0432	1,36436	1,43126	1,45893	1,49082	1,52045	1,57683	1,62832	1,67162	1,70500
200	0,0421	1,38512	1,45551	1,48554	1,51977	1,55189	1,61251	1,66772	1,71429	1,74981
205	0,0410	1,40505	1,47987	1,51260	1,54918	1,58333	1,64825	1,70722	1,75686	1,79485
210	0,0400	1,42390	1,50448	1,53884	1,57836	1,61459	1,68384	1,74684	1,79954	1,83975
215	0,0390	1,44389	1,52915	1,56542	1,60731	1,64584	1,71939	1,78629	1,84238	1,88500
220	0,0381	1,46269	1,55306	1,59171	1,63577	1,67703	1,75493	1,82576	1,88525	1,93000
225	0,0373	1,48150	1,57717	1,61763	1,66460	1,70806	1,79064	1,86531	1,92801	1,97535
230	0,0364	1,50031	1,60094	1,64394	1,69313	1,73898	1,82615	1,90517	1,97094	2,02037
235	0,0356	1,51891	1,62424	1,66987	1,72167	1,77004	1,86166	1,94473	2,01395	2,06576
240	0,0349	1,53675	1,64787	1,69532	1,75007	1,80083	1,89707	1,98442	2,05692	2,11141
245	0,0341	1,55449	1,67100	1,72106	1,77839	1,83165	1,93276	2,02415	2,10022	2,15659
250	0,0334	1,57263	1,69442	1,74719	1,80655	1,86242	1,96820	2,06382	2,14326	2,20243
255	0,0327	1,59045	1,71726	1,77191	1,83473	1,89309	2,00380	2,10377	2,18670	2,24820
260	0,0321	1,60754	1,73962	1,79746	1,86278	1,92374	2,03914	2,14350	2,22964	2,29376
265	0,0315	1,62478	1,76299	1,82266	1,89075	1,95430	2,07485	2,18334	2,27310	2,33934
270	0,0309	1,64181	1,78500	1,84783	1,91871	1,98472	2,11016	2,22323	2,31642	2,38521
275	0,0303	1,65860	1,80801	1,87285	1,94651	2,01525	2,14554	2,26310	2,35983	2,43093
280	0,0297	1,67592	1,82953	1,89766	1,97424	2,04569	2,18134	2,30311	2,40353	2,47716
285	0,0292	1,69201	1,85213	1,92247	2,00196	2,07598	2,21670	2,34294	2,44716	2,52304
290	0,0286	1,70887	1,87403	1,94713	2,02953	2,10638	2,25217	2,38307	2,49059	2,56929
295	0,0281	1,72507	1,89622	1,97181	2,05715	2,13656	2,28748	2,42313	2,53410	2,61496
300	0,0277	1,74139	1,91798	1,99626	2,08454	2,16694	2,32324	2,46338	2,57802	2,66128
305	0,0272	1,75707	1,93973	2,02060	2,11193	2,19700	2,35851	2,50314	2,62148	2,70731
310	0,0267	1,77284	1,96127	2,04487	2,13930	2,22719	2,39391	2,54324	2,66561	2,75340
315	0,0263	1,78900	1,98286	2,06908	2,16660	2,25732	2,42941	2,58366	2,70912	2,80002
320	0,0259	1,80386	2,00412	2,09320	2,19398	2,28735	2,46495	2,62370	2,75321	2,84604
325	0,0254	1,81899	2,02546	2,11734	2,22108	2,31741	2,50051	2,66430	2,79692	2,89247
330	0,0250	1,83547	2,04668	2,14133	2,24818	2,34749	2,53603	2,70437	2,84066	2,93869
335	0,0247	1,84975	2,06783	2,16530	2,27510	2,37756	2,57119	2,74456	2,88482	2,98519
340	0,0243	1,86510	2,08867	2,18907	2,30232	2,40737	2,60678	2,78481	2,92887	3,03191
345	0,0239	1,87985	2,10953	2,21277	2,32930	2,43731	2,64248	2,82547	2,97276	3,07819
350	0,0236	1,89461	2,13030	2,23653	2,35619	2,46734	2,67799	2,86573	3,01694	3,12459
355	0,0232	1,90938	2,15107	2,26017	2,38295	2,49702	2,71353	2,90589	3,06132	3,17174
360	0,0229	1,92416	2,17172	2,28367	2,40976	2,52696	2,74908	2,94677	3,10542	3,21820
365	0,0225	1,93824	2,19220	2,30719	2,43638	2,55670	2,78461	2,98707	3,14961	3,26460
370	0,0222	1,95242	2,21263	2,33051	2,46320	2,58643	2,81974	3,02756	3,19390	3,31085
375	0,0219	1,96727	2,23289	2,35381	2,49001	2,61613	2,85542	3,06826	3,23823	3,35770
380	0,0216	1,98067	2,25322	2,37705	2,51656	2,64577	2,89097	3,10863	3,28256	3,40508
385	0,0213	1,99524	2,27331	2,40022	2,54305	2,67557	2,92670	3,14910	3,32684	3,45058
390	0,0210	2,00914	2,29346	2,42332	2,56944	2,70528	2,96186	3,18964	3,37102	3,49816
395	0,0208	2,02262	2,31352	2,44649	2,59616	2,73486	2,99787	3,23021	3,41573	3,54531
400	0,0205	2,03603	2,33328	2,46936	2,62254	2,76426	3,03324	3,27129	3,46021	3,59205
405	0,0202	2,04948	2,35306	2,49248	2,64899	2,79403	3,06904	3,31182	3,50518	3,63911
410	0,0200	2,06298	2,37285	2,51543	2,67527	2,82359	3,10451	3,35226	3,54916	3,68558
415	0,0197	2,07653	2,39268	2,53822	2,70160	2,85322	3,13996	3,39312	3,59421	3,73233
420	0,0195	2,09013	2,41230	2,56103	2,72795	2,88286	3,17582	3,43442	3,63814	3,77927
425	0,0192	2,10282	2,43190	2,58364	2,75408	2,91253	3,21122	3,47494	3,68316	3,82639
430	0,0190	2,11676	2,45132	2,60623	2,78045	2,94189	3,24698	3,51584	3,72770	3,87272
435	0,0188	2,12922	2,47068	2,62880	2,80655	2,97122	3,28264	3,55708	3,77333	3,92019
440	0,0186	2,14225	2,48999	2,65132	2,83261	3,00049	3,31862	3,59801	3,81672	3,96773
445	0,0183	2,15473	2,50923	2,67379	2,85862	3,03003	3,35400	3,63860	3,86194	4,01424
450	0,0181	2,16750	2,52823	2,69643	2,88484	3,05948	3,38965	3,67947	3,90654	4,06186
455	0,0179	2,18027	2,54752	2,71875	2,91097	3,08917	3,42509	3,72057	3,95212	4,10833
460	0,0177	2,19304	2,56633	2,74124	2,93702	3,11840	3,46079	3,76120	3,99603	4,15587
465	0,0175	2,20493	2,58542	2,76340	2,96296	3,14783	3,49672	3,80273	4,04093	4,20336
470	0,0173	2,21785	2,60440	2,78567	2,98908	3,17711	3,53236	3,84374	4,08685	4,25069
475	0,0171	2,23001	2,62307	2,80781	3,01474	3,20620	3,56767	3,88415	4,13185	4,29787
480	0,0169	2,24259	2,64201	2,83007	3,04085	3,23583	3,60370	3,92543	4,17583	4,34479
485	0,0168	2,25456	2,66081	2,85218	3,06649	3,26525	3,63935	3,96678	4,22175	4,39275
490	0,0166	2,26649	2,67927	2,87414	3,09257	3,29444	3,67514	4,00826	4,26556	4,43909
495	0,0164	2,27839	2,69775	2,89619	3,11811	3,32376	3,71108	4,04900	4,31029	4,48643
>=500	<0,0164	2,29025	2,71649	2,91829	3,14410	3,35281	3,74656	4,09058	4,35598	4,53343

Anlage 3 Verschiebungsfaktoren Tafeln

Verschiebungsfaktoren für Oberbaubereich 4										
Bettungs- modul E_0 [MN/m ²]	Einsenkung am letzten Geofon D_{1800} [mm]	Abstand zum Lastzentrum [mm]								
		0	200	300	450	600	900	1200	1500	1800
115	0,0721	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000
120	0,0693	1,02687	1,02928	1,03009	1,03088	1,03225	1,03477	1,03698	1,03916	1,04096
125	0,0667	1,05290	1,05795	1,05997	1,06242	1,06423	1,06927	1,07384	1,07819	1,08209
130	0,0642	1,07882	1,08607	1,08893	1,09266	1,09631	1,10384	1,11067	1,11724	1,12318
135	0,0620	1,10441	1,11401	1,11857	1,12312	1,12770	1,13783	1,14737	1,15637	1,16433
140	0,0598	1,12916	1,14195	1,14742	1,15330	1,15932	1,17190	1,18404	1,19539	1,20557
145	0,0579	1,15415	1,16943	1,17570	1,18324	1,19016	1,20583	1,22066	1,23446	1,24693
150	0,0560	1,17841	1,19665	1,20382	1,21307	1,22116	1,23961	1,25727	1,27359	1,28823
155	0,0543	1,20232	1,22298	1,23210	1,24238	1,25235	1,27336	1,29374	1,31278	1,32966
160	0,0526	1,22621	1,24954	1,25967	1,27172	1,28294	1,30693	1,33021	1,35190	1,37124
165	0,0511	1,24898	1,27563	1,28718	1,30052	1,31341	1,34045	1,36652	1,39107	1,41273
170	0,0496	1,27213	1,30166	1,31468	1,32916	1,34371	1,37379	1,40297	1,43022	1,45432
175	0,0482	1,29440	1,32750	1,34140	1,35779	1,37393	1,40715	1,43932	1,46941	1,49610
180	0,0469	1,31696	1,35319	1,36853	1,38644	1,40400	1,44034	1,47564	1,50858	1,53772
185	0,0457	1,33911	1,37859	1,39488	1,41475	1,43386	1,47349	1,51189	1,54787	1,57965
190	0,0445	1,36092	1,40376	1,42160	1,44285	1,46359	1,50650	1,54817	1,58712	1,62156
195	0,0434	1,38239	1,42870	1,44803	1,47082	1,49328	1,53947	1,58437	1,62632	1,66345
200	0,0423	1,40410	1,45318	1,47402	1,49873	1,52265	1,57240	1,62062	1,66564	1,70554
205	0,0413	1,42537	1,47736	1,49995	1,52635	1,55210	1,60532	1,65681	1,70498	1,74770
210	0,0403	1,44568	1,50181	1,52575	1,55386	1,58135	1,63802	1,69313	1,74455	1,78955
215	0,0394	1,46679	1,52586	1,55138	1,58129	1,61054	1,67076	1,72933	1,78388	1,83206
220	0,0385	1,48674	1,54989	1,57686	1,60859	1,63959	1,70335	1,76545	1,82340	1,87420
225	0,0376	1,50689	1,57362	1,60212	1,63579	1,66844	1,73595	1,80155	1,86282	1,91654
230	0,0368	1,52725	1,59727	1,62732	1,66272	1,69724	1,76852	1,83790	1,90244	1,95896
235	0,0360	1,54701	1,62060	1,65241	1,68966	1,72605	1,80095	1,87406	1,94172	2,00137
240	0,0353	1,56620	1,64393	1,67722	1,71644	1,75471	1,83334	1,91011	1,98146	2,04392
245	0,0346	1,58558	1,66705	1,70192	1,74311	1,78326	1,86593	1,94637	2,02113	2,08650
250	0,0339	1,60506	1,68999	1,72659	1,76965	1,81182	1,89818	1,98236	2,06061	2,12932
255	0,0332	1,62396	1,71274	1,75105	1,79611	1,84018	1,93052	2,01862	2,10059	2,17197
260	0,0326	1,64300	1,73546	1,77539	1,82260	1,86855	1,96271	2,05466	2,14020	2,21466
265	0,0320	1,66127	1,75800	1,79969	1,84879	1,89677	1,99524	2,09084	2,17990	2,25730
270	0,0314	1,67974	1,78045	1,82392	1,87505	1,92478	2,02714	2,12711	2,21989	2,30050
275	0,0308	1,69829	1,80279	1,84791	1,90093	1,95298	2,05928	2,16317	2,25951	2,34311
280	0,0302	1,71649	1,82484	1,87175	1,92710	1,98104	2,09163	2,19944	2,29962	2,38654
285	0,0297	1,73451	1,84696	1,89568	1,95294	2,00892	2,12375	2,23561	2,33950	2,42915
290	0,0292	1,75250	1,86886	1,91940	1,97871	2,03672	2,15577	2,27162	2,37942	2,47247
295	0,0287	1,77015	1,89062	1,94301	2,00454	2,06461	2,18766	2,30824	2,41931	2,51558
300	0,0282	1,78772	1,91227	1,96650	2,03008	2,09234	2,22003	2,34430	2,45944	2,55889
305	0,0277	1,80524	1,93385	1,98995	2,05578	2,11989	2,25172	2,38030	2,49942	2,60228
310	0,0273	1,82254	1,95526	2,01323	2,08127	2,14761	2,28384	2,41649	2,53954	2,64524
315	0,0268	1,84001	1,97671	2,03642	2,10653	2,17528	2,31587	2,45315	2,57976	2,68914
320	0,0264	1,85665	1,99793	2,05952	2,13205	2,20264	2,34778	2,48896	2,61960	2,73244
325	0,0260	1,87367	2,01901	2,08249	2,15728	2,23030	2,37979	2,52549	2,65983	2,77610
330	0,0256	1,89073	2,04008	2,10549	2,18256	2,25758	2,41160	2,56172	2,69998	2,81897
335	0,0252	1,90713	2,06100	2,12850	2,20767	2,28513	2,44342	2,59791	2,74045	2,86259
340	0,0248	1,92363	2,08189	2,15114	2,23275	2,31223	2,47523	2,63403	2,78075	2,90646
345	0,0245	1,94003	2,10257	2,17393	2,25782	2,33952	2,50729	2,67042	2,82079	2,94986
350	0,0241	1,95634	2,12315	2,19665	2,28285	2,36676	2,53898	2,70665	2,86101	2,99393
355	0,0238	1,97255	2,14366	2,21910	2,30760	2,39395	2,57086	2,74307	2,90189	3,03745
360	0,0234	1,98851	2,16422	2,24147	2,33245	2,42101	2,60259	2,77925	2,94183	3,08157
365	0,0231	2,00461	2,18468	2,26390	2,35720	2,44796	2,63415	2,81556	2,98236	3,12497
370	0,0228	2,02038	2,20482	2,28621	2,38179	2,47499	2,66581	2,85239	3,02291	3,16890
375	0,0225	2,03637	2,22517	2,30856	2,40668	2,50211	2,69756	2,88842	3,06344	3,21266
380	0,0222	2,05180	2,24534	2,33053	2,43116	2,52904	2,72938	2,92491	3,10390	3,25692
385	0,0219	2,06759	2,26533	2,35274	2,45567	2,55600	2,76124	2,96094	3,14482	3,30013
390	0,0216	2,08275	2,28529	2,37471	2,48021	2,58270	2,79275	2,99738	3,18501	3,34451
395	0,0213	2,09806	2,30523	2,39690	2,50472	2,60969	2,82462	3,03373	3,22559	3,38932
400	0,0210	2,11333	2,32495	2,41862	2,52898	2,63639	2,85607	3,07052	3,26659	3,43287
405	0,0208	2,12834	2,34460	2,44074	2,55319	2,66333	2,88823	3,10715	3,30731	3,47756
410	0,0205	2,14345	2,36418	2,46235	2,57762	2,68993	2,91952	3,14309	3,34766	3,52170
415	0,0202	2,15827	2,38387	2,48413	2,60170	2,71675	2,95150	3,17987	3,38905	3,56522
420	0,0200	2,17316	2,40328	2,50583	2,62598	2,74317	2,98335	3,21642	3,42931	3,60982
425	0,0197	2,18795	2,42281	2,52743	2,65016	2,77012	3,01462	3,25269	3,47054	3,65467
430	0,0195	2,20288	2,44223	2,54891	2,67422	2,79629	3,04611	3,28920	3,51127	3,69776
435	0,0193	2,21770	2,46127	2,57026	2,69815	2,82296	3,07782	3,32597	3,55297	3,74281
440	0,0191	2,23199	2,48066	2,59174	2,72222	2,84948	3,10975	3,36295	3,59254	3,78706
445	0,0188	2,24613	2,49966	2,61306	2,74614	2,87580	3,14095	3,39893	3,63460	3,83131
450	0,0186	2,26041	2,51874	2,63446	2,77015	2,90226	3,17279	3,43566	3,67516	3,87661
455	0,0184	2,27451	2,53785	2,65571	2,79401	2,92885	3,20432	3,47193	3,71670	3,92087
460	0,0182	2,28906	2,55657	2,67703	2,81794	2,95522	3,23598	3,50831	3,75742	3,96614
465	0,0180	2,30276	2,57556	2,69813	2,84165	2,98169	3,26728	3,54547	3,79819	4,01024
470	0,0178	2,31689	2,59435	2,71902	2,86542	3,00788	3,29918	3,58204	3,83986	4,05533
475	0,0176	2,33114	2,61292	2,73996	2,88896	3,03416	3,33068	3,61867	3,88062	4,09912
480	0,0174	2,34457	2,63175	2,76124	2,91290	3,06050	3,36225	3,65536	3,92129	4,14387
485	0,0172	2,35847	2,65035	2,78226	2,93655	3,08691	3,39388	3,69209	3,96289	4,18960
490	0,0170	2,37216	2,66897	2,80301	2,96022	3,11298	3,42557	3,72881	4,00336	4,23386
495	0,0169	2,38563	2,68734	2,82375	2,98360	3,13906	3,45672	3,76550	4,04467	4,27907
>=500	<0,0169	2,39908	2,70596	2,84484	3,00732	3,16518	3,48845	3,80216	4,08586	4,32267

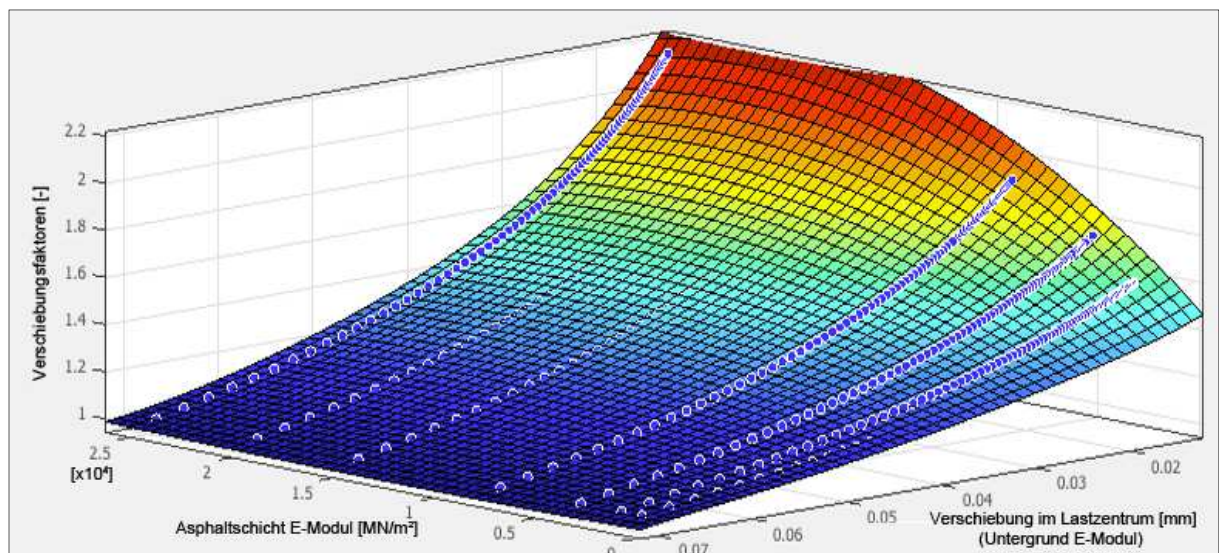
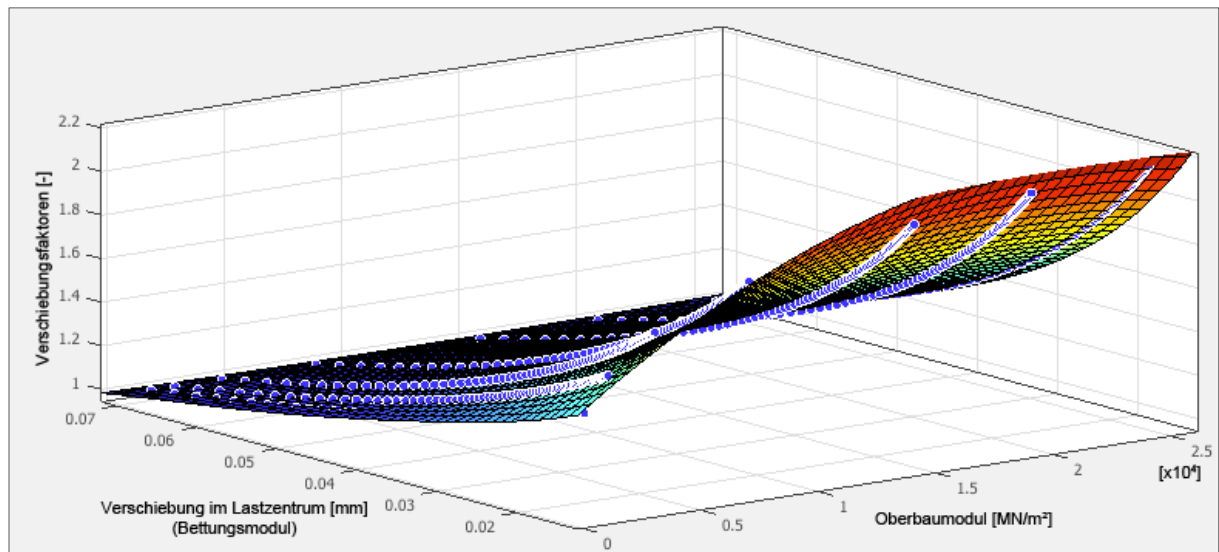
Verschiebungsfaktoren für Oberbaubereich 5										
Bettungs- modul E_0 [MN/m ²]	Einsenkung am letzten Geofon D_{1800} [mm]	Abstand zum Lastzentrum [mm]								
		0	200	300	450	600	900	1200	1500	1800
115	0,0690	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000
120	0,0664	1,02728	1,02913	1,02979	1,03031	1,03150	1,03334	1,03526	1,03715	1,03891
125	0,0640	1,05393	1,05771	1,05934	1,06095	1,06233	1,06649	1,07034	1,07416	1,07785
130	0,0618	1,08050	1,08562	1,08811	1,09084	1,09340	1,09948	1,10538	1,11109	1,11675
135	0,0597	1,10643	1,11365	1,11700	1,12037	1,12408	1,13219	1,14012	1,14800	1,15565
140	0,0577	1,13232	1,14119	1,14549	1,14998	1,15448	1,16475	1,17485	1,18488	1,19445
145	0,0559	1,15779	1,16873	1,17339	1,17896	1,18466	1,19710	1,20945	1,22158	1,23342
150	0,0542	1,18270	1,19567	1,20124	1,20786	1,21460	1,22922	1,24397	1,25837	1,27219
155	0,0526	1,20736	1,22189	1,22894	1,23651	1,24436	1,26126	1,27832	1,29515	1,31111
160	0,0511	1,23189	1,24862	1,25628	1,26484	1,27381	1,29314	1,31259	1,33171	1,35011
165	0,0497	1,25554	1,27466	1,28331	1,29311	1,30313	1,32482	1,34675	1,36833	1,38898
170	0,0483	1,27953	1,30055	1,31014	1,32096	1,33229	1,35654	1,38093	1,40497	1,42794
175	0,0470	1,30257	1,32622	1,33677	1,34885	1,36125	1,38796	1,41491	1,44159	1,46696
180	0,0458	1,32581	1,35165	1,36308	1,37635	1,39009	1,41939	1,44888	1,47804	1,50570
185	0,0446	1,34873	1,37675	1,38933	1,40382	1,41872	1,45059	1,48284	1,51459	1,54482
190	0,0435	1,37130	1,40169	1,41526	1,43098	1,44714	1,48169	1,51655	1,55111	1,58384
195	0,0425	1,39368	1,42648	1,44107	1,45802	1,47556	1,51269	1,55028	1,58747	1,62297
200	0,0415	1,41582	1,45098	1,46658	1,48497	1,50370	1,54362	1,58392	1,62386	1,66207
205	0,0405	1,43766	1,47529	1,49202	1,51155	1,53179	1,57440	1,61768	1,66034	1,70123
210	0,0396	1,45940	1,49945	1,51722	1,53812	1,55966	1,60508	1,65131	1,69700	1,74029
215	0,0388	1,48080	1,52351	1,54233	1,56462	1,58746	1,63568	1,68488	1,73336	1,77958
220	0,0379	1,50203	1,54730	1,56730	1,59086	1,61513	1,66631	1,71845	1,76989	1,81853
225	0,0371	1,52311	1,57089	1,59207	1,61704	1,64248	1,69658	1,75177	1,80629	1,85796
230	0,0364	1,54401	1,59443	1,61669	1,64296	1,66996	1,72718	1,78529	1,84267	1,89732
235	0,0356	1,56458	1,61767	1,64112	1,66881	1,69712	1,75726	1,81876	1,87894	1,93648
240	0,0349	1,58499	1,64075	1,66532	1,69456	1,72446	1,78757	1,85210	1,91571	1,97587
245	0,0342	1,60531	1,66380	1,68947	1,72016	1,75136	1,81770	1,88523	1,95196	2,01514
250	0,0336	1,62540	1,68651	1,71354	1,74568	1,77849	1,84779	1,91849	1,98833	2,05477
255	0,0329	1,64532	1,70921	1,73752	1,77096	1,80538	1,87777	1,95183	2,02474	2,09408
260	0,0323	1,66518	1,73175	1,76118	1,79638	1,83212	1,90778	1,98496	2,06141	2,13360
265	0,0317	1,68472	1,75423	1,78494	1,82146	1,85883	1,93776	2,01829	2,09771	2,17293
270	0,0312	1,70411	1,77646	1,80845	1,84662	1,88529	1,96748	2,05127	2,13442	2,21268
275	0,0306	1,72348	1,79870	1,83187	1,87135	1,91180	1,99727	2,08458	2,17091	2,25206
280	0,0301	1,74255	1,82066	1,85511	1,89641	1,93817	2,02688	2,11769	2,20740	2,29211
285	0,0296	1,76153	1,84270	1,87832	1,92112	1,96453	2,05671	2,15077	2,24382	2,33125
290	0,0291	1,78040	1,86437	1,90132	1,94561	1,99066	2,08629	2,18379	2,28012	2,37133
295	0,0286	1,79903	1,88595	1,92439	1,97036	2,01710	2,11578	2,21697	2,31655	2,41114
300	0,0281	1,81750	1,90755	1,94717	1,99464	2,04303	2,14537	2,25000	2,35346	2,45055
305	0,0277	1,83608	1,92885	1,96998	2,01915	2,06902	2,17482	2,28310	2,39006	2,49084
310	0,0273	1,85435	1,95029	1,99262	2,04351	2,09504	2,20430	2,31594	2,42630	2,53014
315	0,0268	1,87241	1,97153	2,01525	2,06745	2,12107	2,23380	2,34908	2,46286	2,57070
320	0,0264	1,89039	1,99255	2,03765	2,09177	2,14664	2,26302	2,38187	2,49931	2,61060
325	0,0260	1,90826	2,01350	2,05999	2,11561	2,17237	2,29245	2,41489	2,53603	2,65025
330	0,0256	1,92602	2,03437	2,08224	2,13980	2,19804	2,32151	2,44780	2,57255	2,69005
335	0,0253	1,94380	2,05510	2,10457	2,16368	2,22382	2,35074	2,48089	2,60969	2,73053
340	0,0249	1,96128	2,07588	2,12659	2,18743	2,24926	2,37981	2,51377	2,64610	2,77003
345	0,0245	1,97861	2,09653	2,14864	2,21102	2,27452	2,40899	2,54679	2,68260	2,81010
350	0,0242	1,99592	2,11702	2,17054	2,23490	2,30011	2,43827	2,57950	2,71916	2,85077
355	0,0239	2,01320	2,13729	2,19224	2,25835	2,32548	2,46731	2,61268	2,75574	2,89080
360	0,0235	2,03028	2,15777	2,21395	2,28181	2,35062	2,49604	2,64548	2,79281	2,93137
365	0,0232	2,04728	2,17800	2,23564	2,30553	2,37577	2,52513	2,67828	2,82933	2,97115
370	0,0229	2,06409	2,19800	2,25730	2,32874	2,40119	2,55420	2,71147	2,86628	3,01139
375	0,0226	2,08110	2,21814	2,27892	2,35214	2,42629	2,58324	2,74418	2,90257	3,05205
380	0,0223	2,09759	2,23824	2,30026	2,37524	2,45133	2,61223	2,77723	2,93922	3,09243
385	0,0220	2,11393	2,25803	2,32174	2,39855	2,47662	2,64113	2,80969	2,97681	3,13246
390	0,0217	2,13052	2,27796	2,34317	2,42175	2,50121	2,66993	2,84293	3,01301	3,17284
395	0,0215	2,14683	2,29753	2,36446	2,44487	2,52630	2,69858	2,87550	3,05010	3,21351
400	0,0212	2,16317	2,31722	2,38539	2,46786	2,55127	2,72747	2,90834	3,08687	3,25369
405	0,0209	2,17941	2,33678	2,40669	2,49072	2,57608	2,75658	2,94143	3,12327	3,29490
410	0,0207	2,19546	2,35618	2,42760	2,51369	2,60073	2,78508	2,97424	3,16054	3,33555
415	0,0204	2,21139	2,37568	2,44859	2,53620	2,62554	2,81376	3,00726	3,19738	3,37556
420	0,0202	2,22732	2,39501	2,46969	2,55912	2,65014	2,84260	3,03995	3,23440	3,41654
425	0,0200	2,24306	2,41437	2,49030	2,58183	2,67484	2,87117	3,07279	3,27160	3,45680
430	0,0197	2,25885	2,43353	2,51130	2,60466	2,69933	2,89989	3,10579	3,30824	3,49711
435	0,0195	2,27499	2,45251	2,53177	2,62724	2,72390	2,92871	3,13835	3,34572	3,53842
440	0,0193	2,28998	2,47175	2,55257	2,64988	2,74854	2,95719	3,17161	3,38180	3,57881
445	0,0191	2,30555	2,49050	2,57313	2,67224	2,77291	2,98577	3,20377	3,41945	3,62013
450	0,0188	2,32089	2,50954	2,59373	2,69467	2,79732	3,01441	3,23720	3,45639	3,66147
455	0,0186	2,33599	2,52861	2,61434	2,71747	2,82179	3,04262	3,26945	3,49333	3,70178
460	0,0184	2,35168	2,54709	2,63466	2,73996	2,84628	3,07136	3,30236	3,53106	3,74298
465	0,0182	2,36657	2,56585	2,65500	2,76212	2,87041	3,09965	3,33529	3,56715	3,78405
470	0,0180	2,38179	2,58462	2,67501	2,78429	2,89456	3,12845	3,36821	3,60482	3,82500
475	0,0178	2,39674	2,60307	2,69533	2,80643	2,91911	3,15727	3,40179	3,64156	3,86573
480	0,0177	2,41167	2,62179	2,71560	2,82893	2,94325	3,18555	3,43466	3,67906	3,90626
485	0,0175	2,42651	2,64016	2,73586	2,85104	2,96734	3,21378	3,46676	3,71555	3,94765
490	0,0173	2,44132	2,65847	2,75612	2,87313	2,99141	3,24253	3,49947	3,75276	3,98874
495	0,0171	2,45581	2,67707	2,77561	2,89515	3,01546	3,27009	3,53280	3,78982	4,02956
>=500	<0,0171	2,47047	2,69525	2,79608	2,91714	3,03942	3,29928	3,56529	3,82757	4,06997

Anlage 4 Tabellarische Darstellung der Tragfähigkeitsklassen A – E

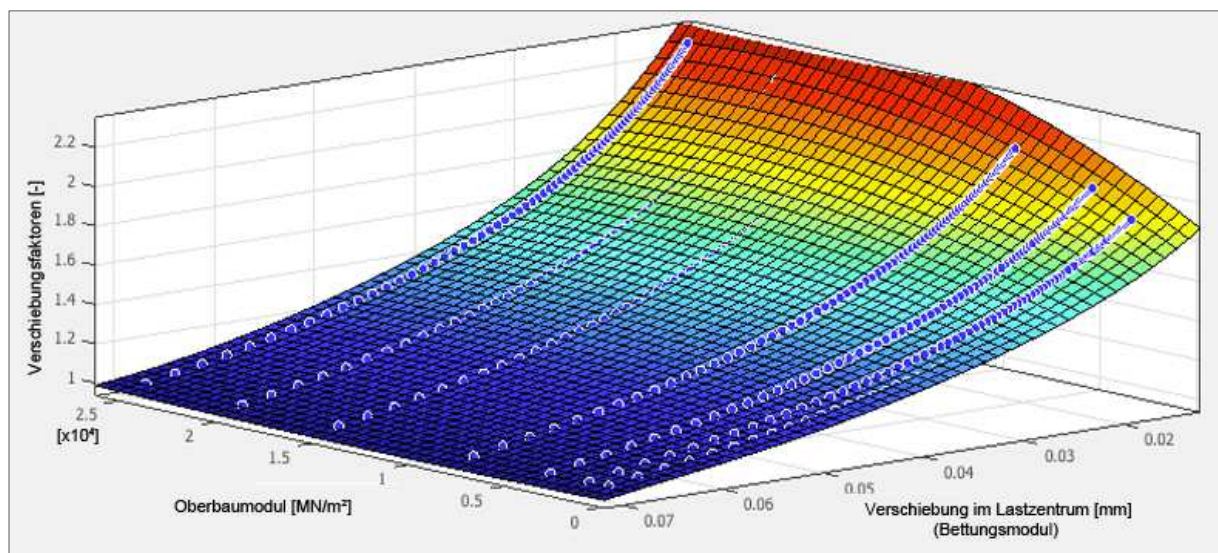
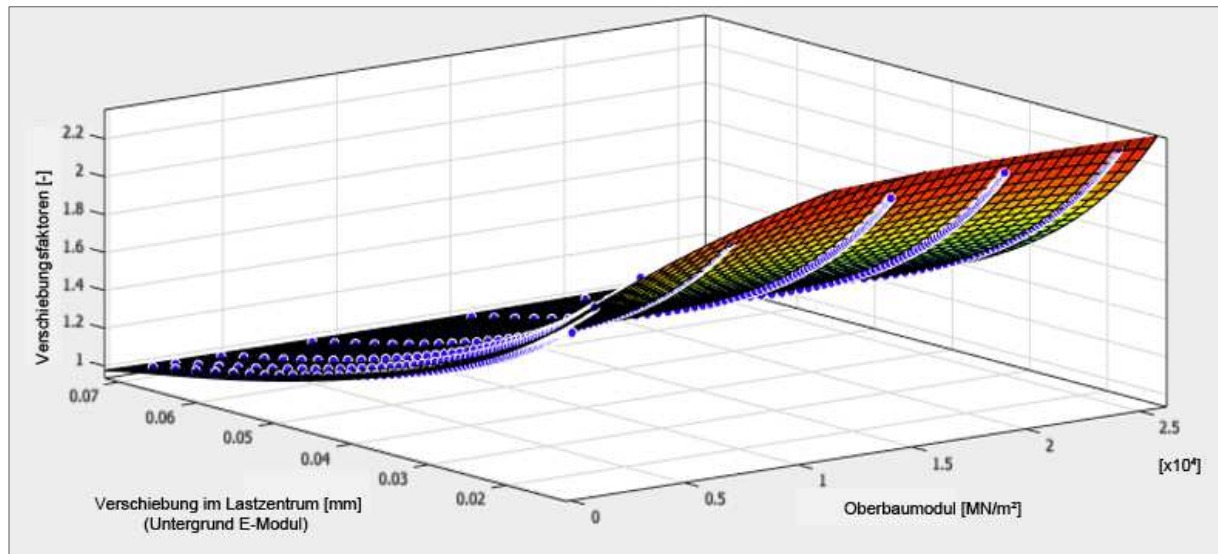
Tragfähig- keitsklasse	Deflexion [mm] am Abstand zum Lastzentrum [mm]								
	0	200	300	450	600	900	1200	1500	1800
A	0,17850	0,15960	0,15200	0,14270	0,13360	0,11590	0,09981	0,08572	0,06900
B	0,19510	0,17520	0,16640	0,15510	0,14390	0,12260	0,10370	0,08755	0,06900
C	0,21570	0,19420	0,18380	0,16960	0,15560	0,12950	0,10710	0,08877	0,06900
D	0,24210	0,21810	0,20510	0,18680	0,16890	0,13650	0,10990	0,08910	0,06900
E	0,25830	0,23240	0,21770	0,19650	0,17610	0,13980	0,11080	0,08881	0,06900

Anlage 5 Verschiebungsfaktoren 3D Diagramme

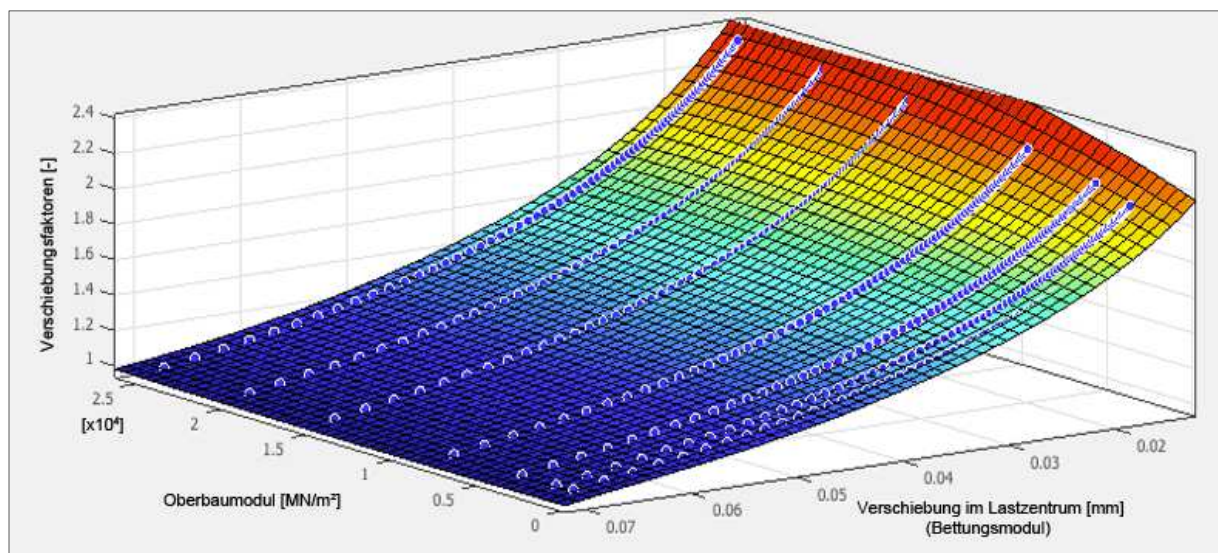
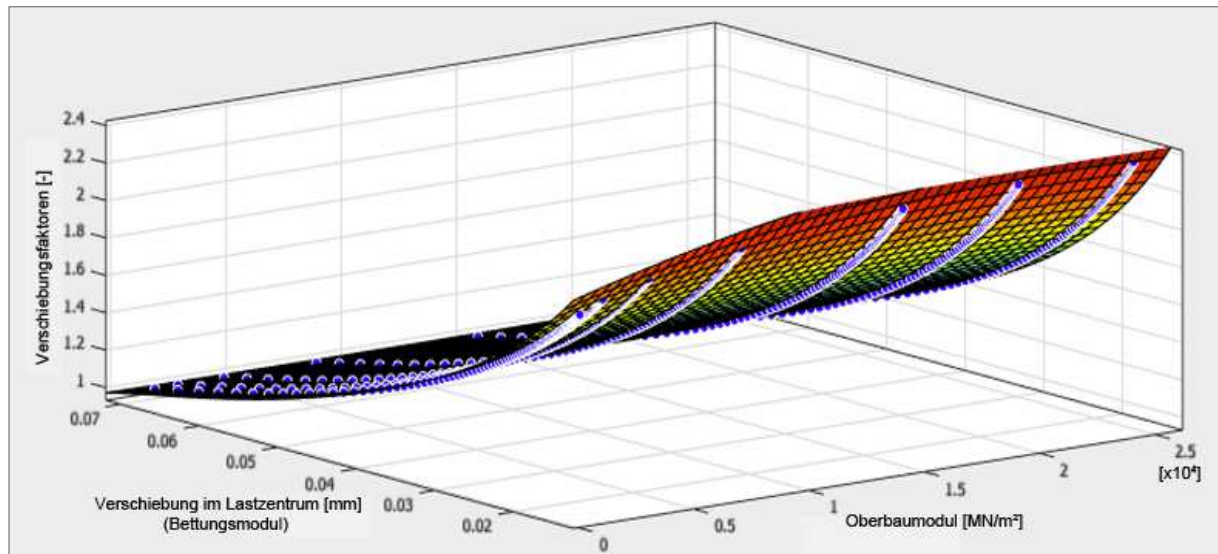
Abstand zum Lastzentrum: 0 mm



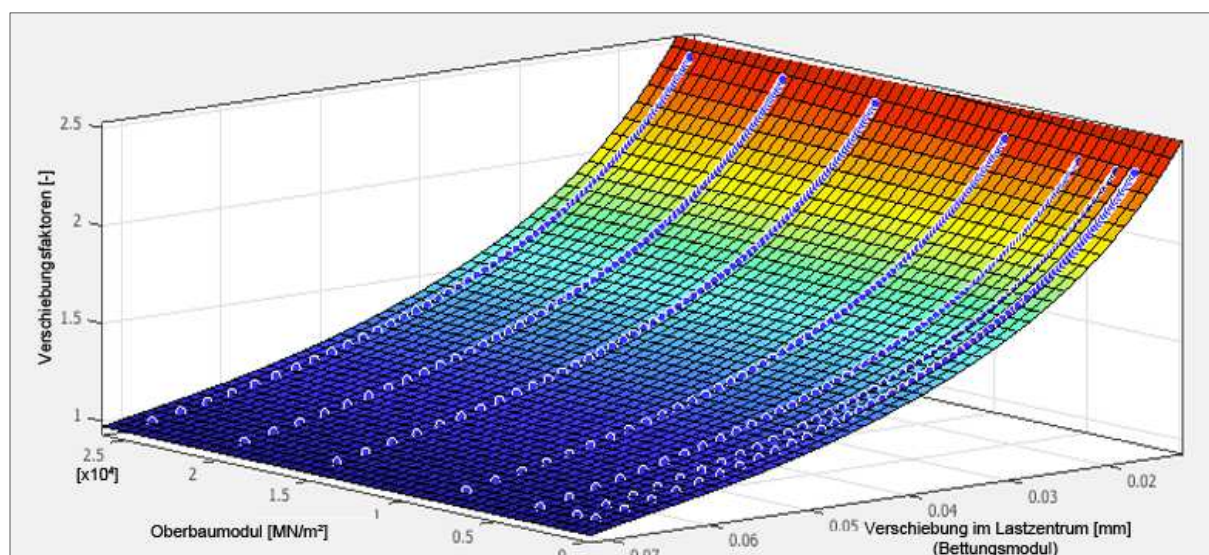
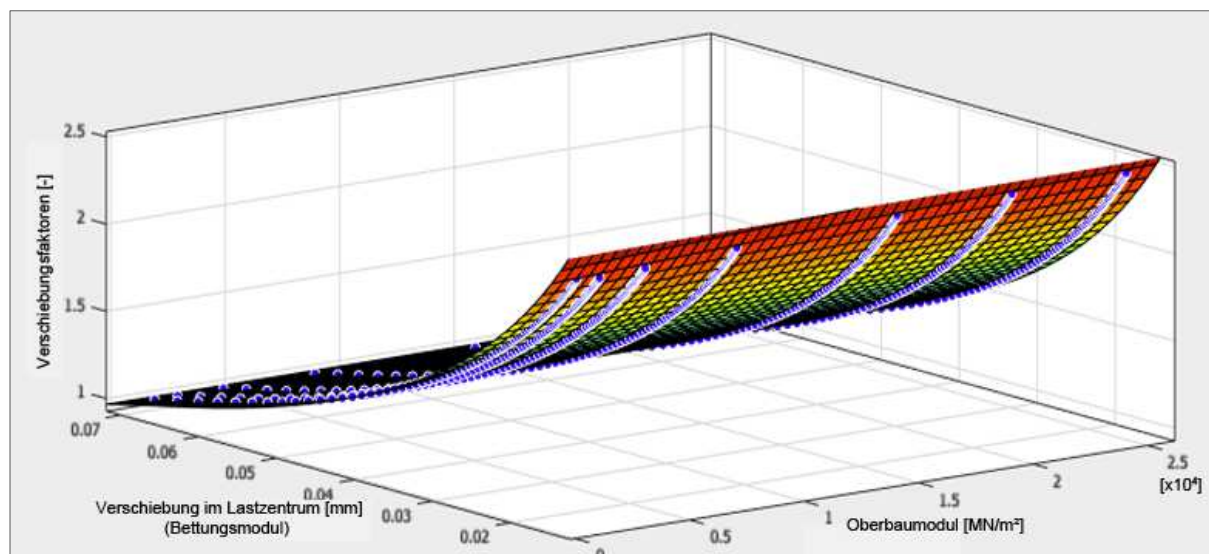
Abstand zum Lastzentrum: 200 mm



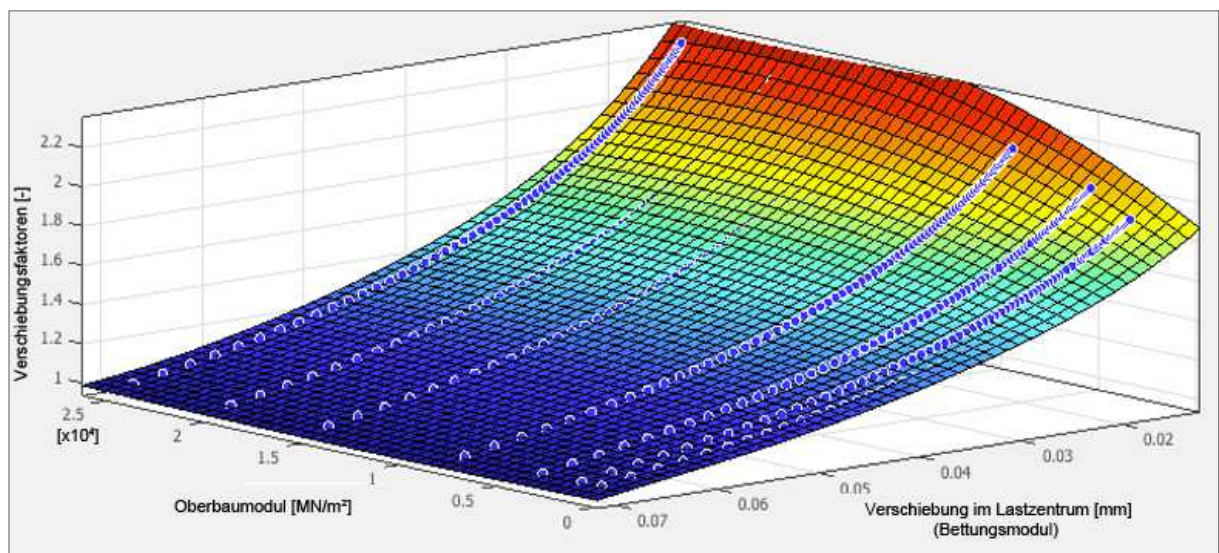
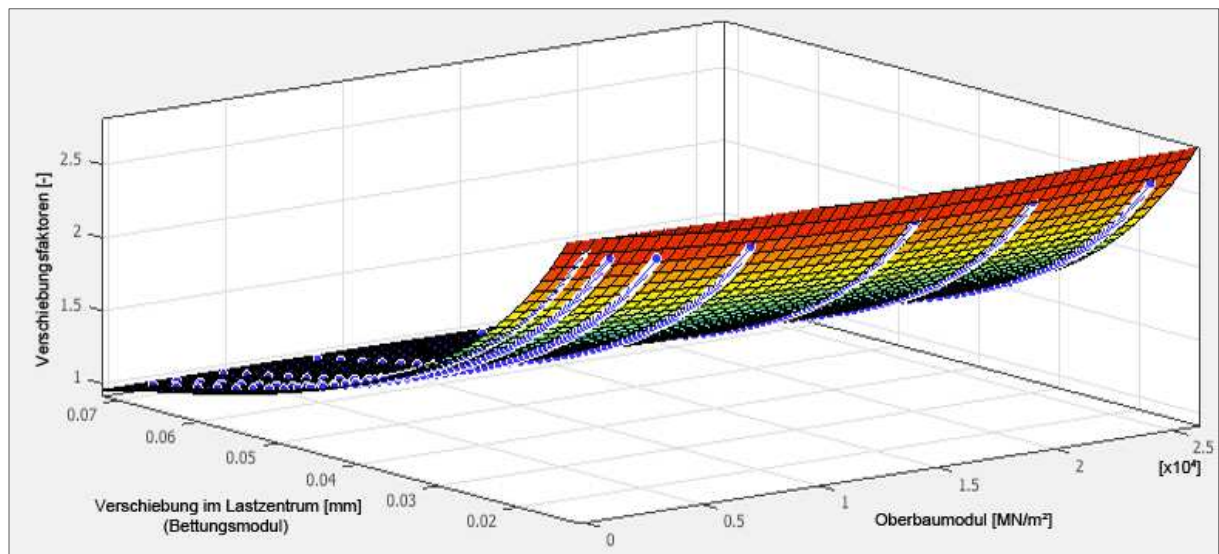
Abstand zum Lastzentrum: 300 mm



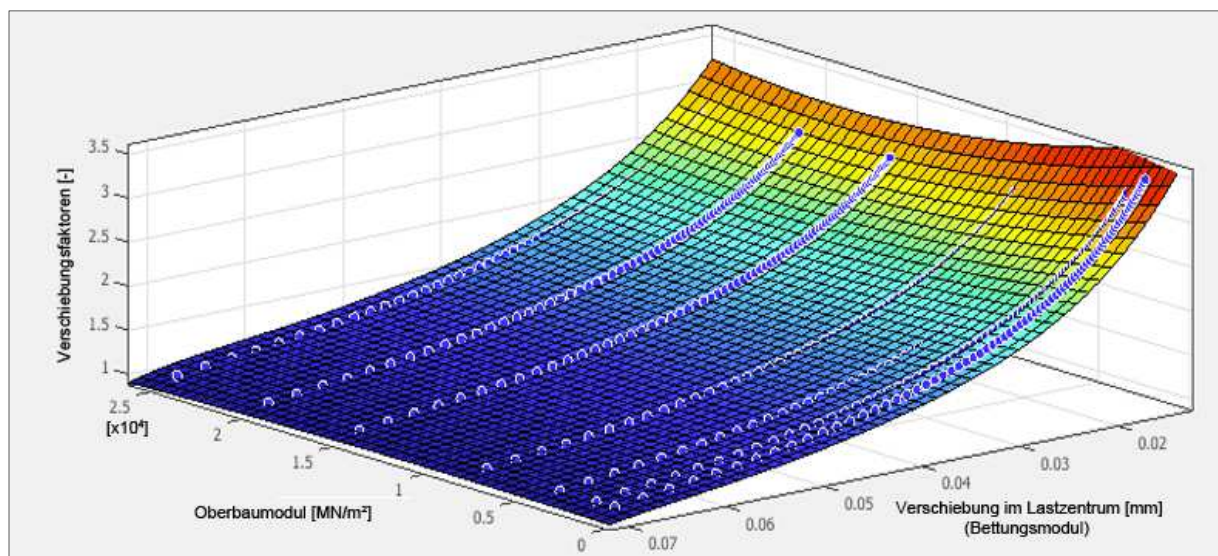
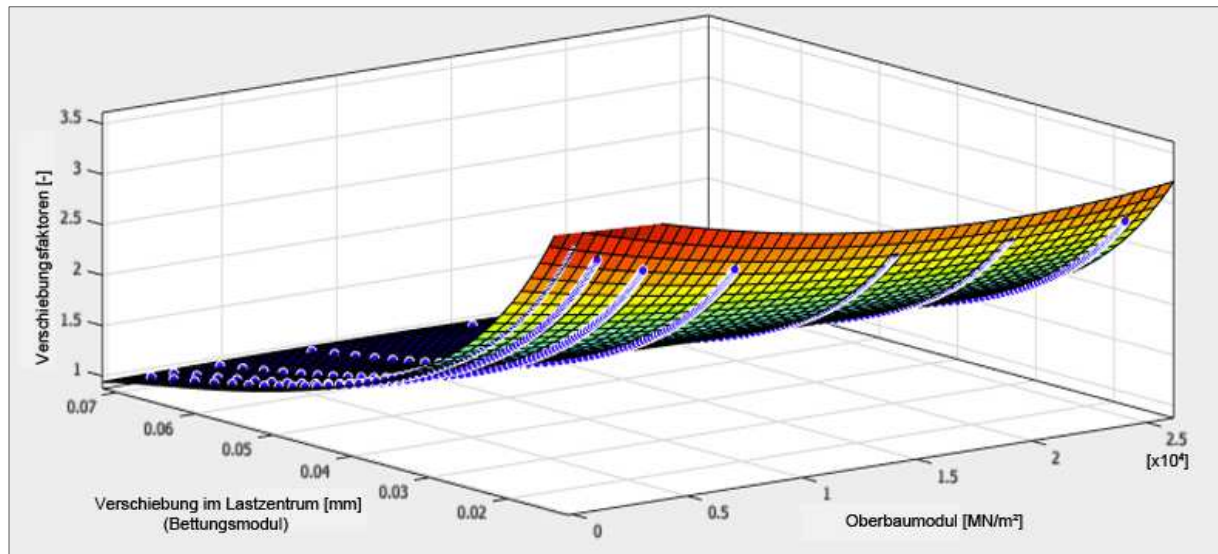
Abstand zum Lastzentrum: 450 mm



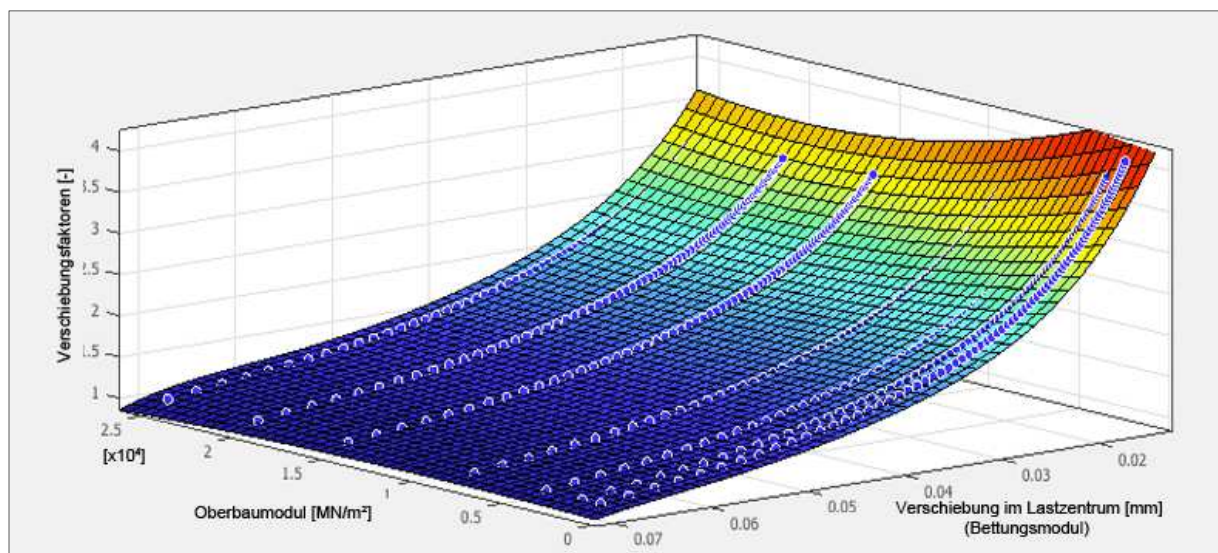
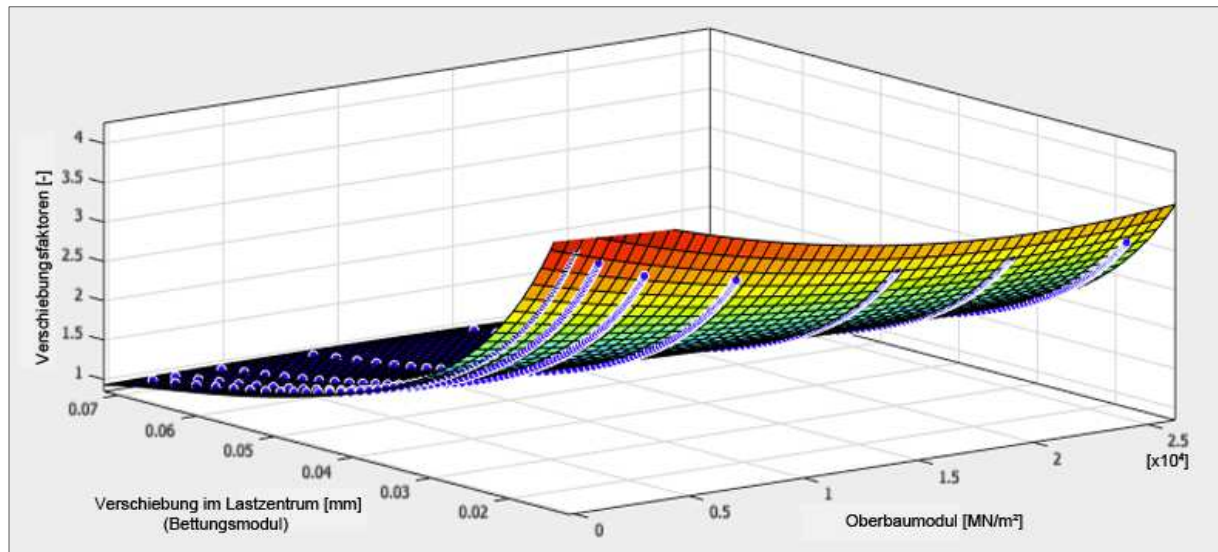
Abstand zum Lastzentrum: 600 mm



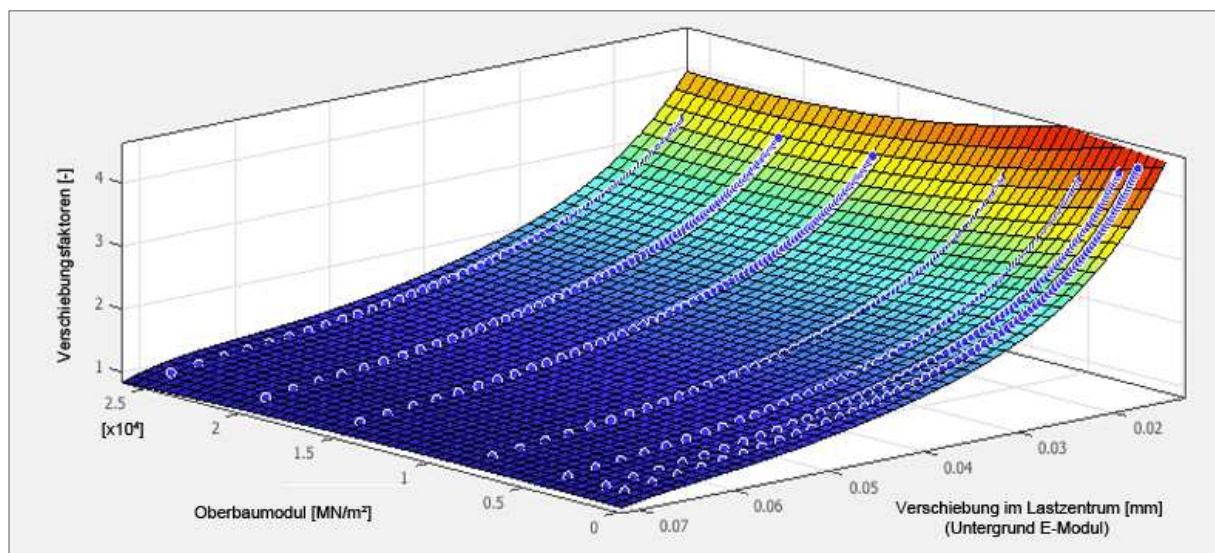
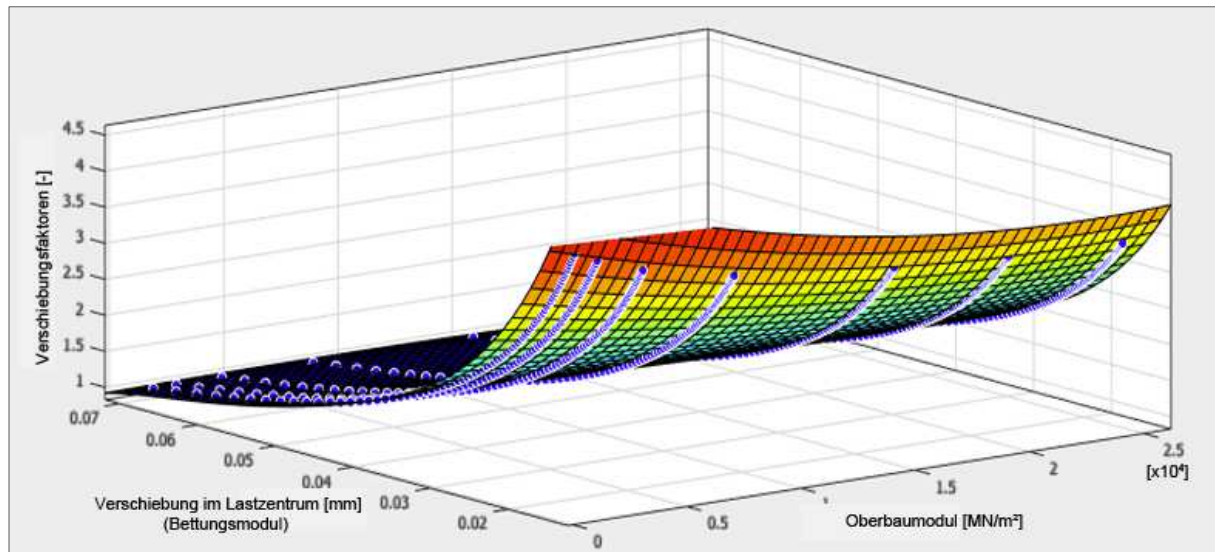
Abstand zum Lastzentrum: 900 mm



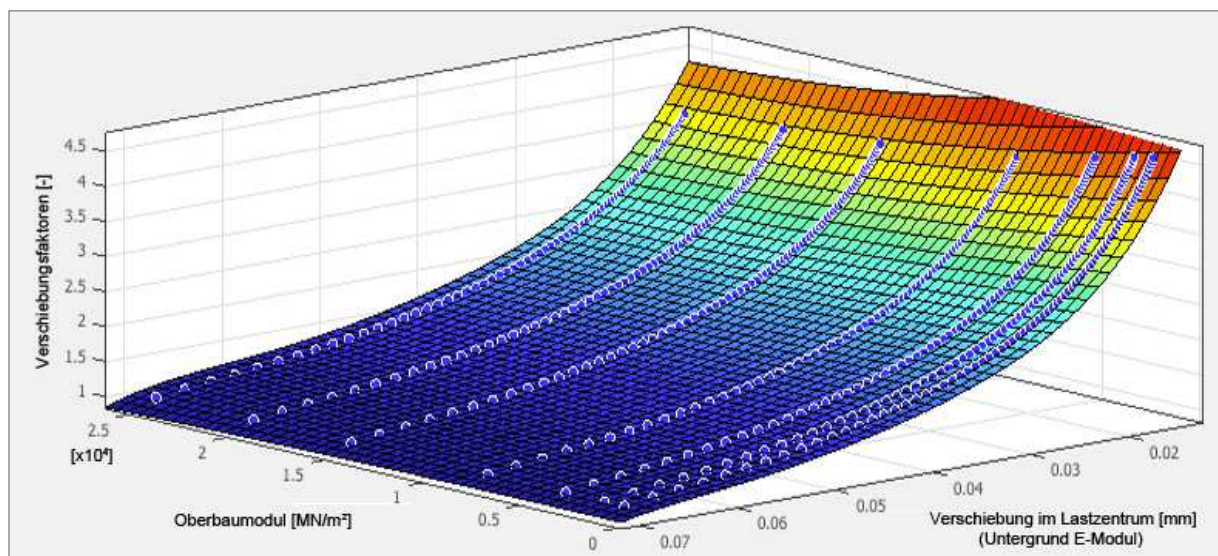
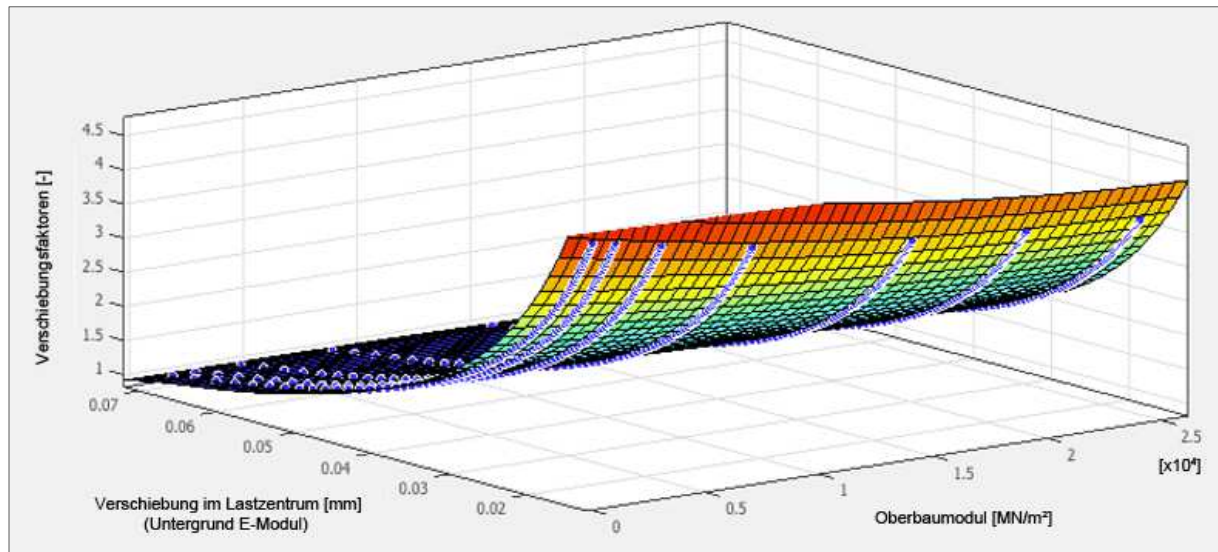
Abstand zum Lastzentrum: 1200 mm



Abstand zum Lastzentrum: 1500 mm



Abstand zum Lastzentrum: 1800 mm



Anlage 6 Theorie des FWD-Verfahrens

Die Theorie des FWD-Verfahrens wurde von Straube et al [8] wie nachfolgend beschrieben:

Das FWD ist ein dynamisches Messverfahren welches das Verhalten der Straßenbefestigung durch ein schwingungsfähiges System a, b, c beschreibt, vgl. Abbildung 9.1.

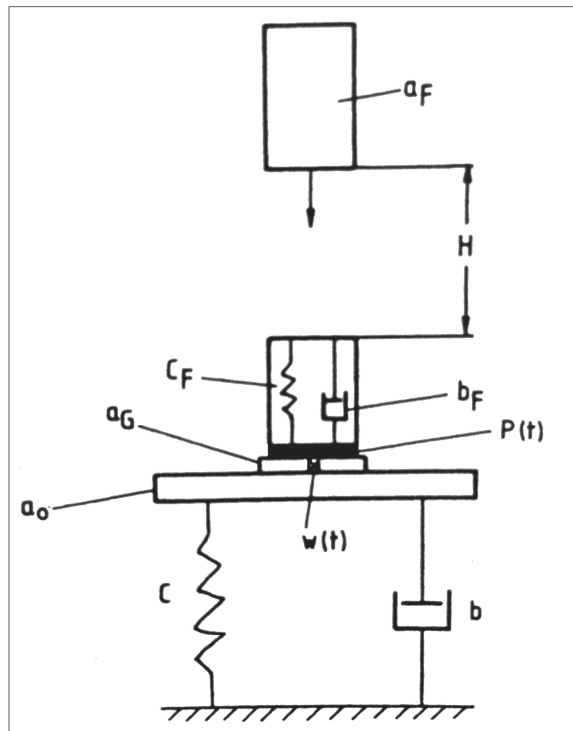


Abbildung 9.1: Modelldarstellung des FWD-Versuches [8]

Die Masse a besteht aus der mitschwingenden Masse a_0 und einer Geschirrmasse a_G des FWD. Der Impuls $P(t)$ wird in einem Feder-Dämpfer-System c_F , b_F erzeugt, auf das die Masse a_F fällt. Der Impuls wird mit einer Kraftmessdose gemessen und über die Grundplatte in die Fahrbahnbefestigung eingeleitet. Die Messung der Bewegung $w(t)$ erfolgt durch ein Geofon. Die Geschirrmasse besteht aus den Massen der Grundplatte, der Kraftmessdose und anderer Geräteteile unterhalb der Feder c_F und dem Dämpfer b_F . In Wirklichkeit besteht das c_F - b_F -System aus Hartgummipuffer mit elastischen Eigenschaften (c_F) und innerer Reibung (b_F).

Die mathematische Beschreibung des Modells basiert auf zwei gekoppelte Differentialgleichungen. Aus der Lösung dieser Gleichungssysteme ergibt sich $P(t)$ und $w(t)$. Zur wirklichkeitstreuen Beschreibung müssen die nachfolgenden Bedingungen erfüllt sein:

- Das c_F - b_F -System ist linear
- Beim Auftreffen der Masse a_F entsteht ein unelastischer Stoß, d.h. die Fallmasse bleibt mit den Gummipuffern verbunden

Die Bedingungen werden in Wirklichkeit aber nicht vollkommen erfüllt, da sich das Hartgummi der Gummipuffer nicht linear verhält und die Fallmasse nach dem Aufprall wieder hochspringt, der Stoß ist somit zu mindestens teilelastisch. Die Anwendbarkeit des linearen c_F - b_F -Systems ist somit fragwürdig. Trotzdem wird die mathematisch ziemlich aufwendige Lösung von Straube et al [8] vollständig durchgeführt, weil mit ihr die grundsätzlichen Fragen zur Methode der Fallgewichtsmessung geklärt werden konnten.

Zur Berechnung von $P(t)$ und $w(t)$ müssen u.a. die Fallmasse a_F , die Geschirrmasse a_G , die Eigenfrequenz f_0 und der Dämpfungsgrad D des c_F - b_F -Systems bekannt sein. In Abbildung 9.2 ist ein Beispiel für die Berechnung von $P(t)$ und $w(t)$ aus dem Modell dargestellt.

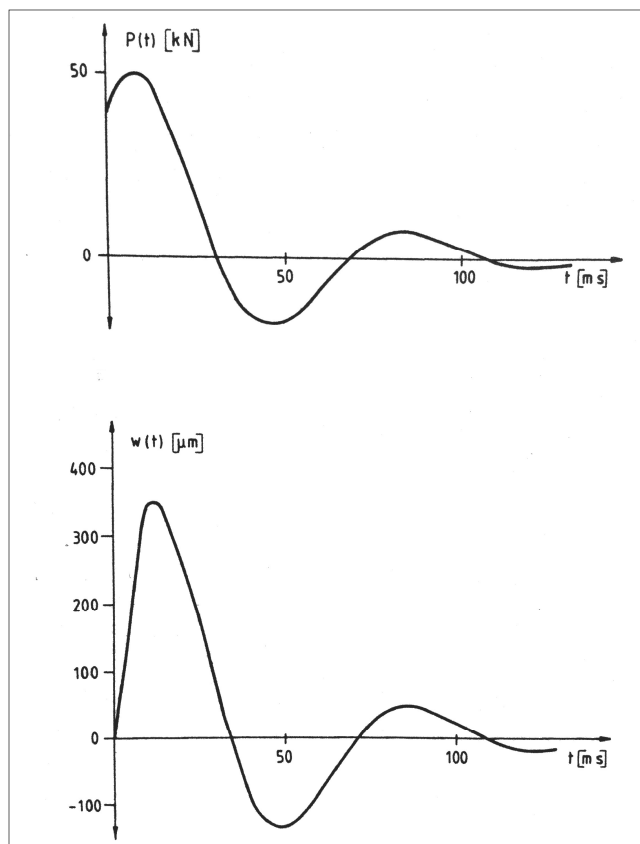


Abbildung 9.2: Kraft $P(t)$ und Deflexion $w(t)$ aus dem Modell des FWD [8]

Es ist zu erkennen, dass die Kraft $P(t)$ bei $t=0$ spontan auf einen bestimmten Wert springt und die Schwingung nachfolgend rasch abklingt. Die dynamische Steifigkeit

(Tragfähigkeit) S wird aus dem Maximum P_0 der Kraft und dem Maximum w_0 der Bewegung bestimmt ($S = P_0/w_0$). In S ist der Einfluss der Masse a und der Dämpfung b enthalten, darüber hinaus aber auch der des angekoppelten Gerätesystems a_F , b_F , c_F . Da c die eigentliche Größe ist, welche beim FWD-Versuch ermittelt wird, ist es von Interesse das Verhältnis S/c zu untersuchen.

In Abbildung 9.3 ist ein mit dem FWD erzeugter Impuls $P(t)$ durch Punkte dargestellt. Im Gegensatz zum theoretisch berechneten Kraftverlauf ist $P = 0$ bei $t = 0$. Auffallend ist ein Knick im Anstiegsbereich von $P(t)$ bei $t = 6\text{ms}$. Dieser Knick tritt bei allen Versuchen auf und bei allen FWD-Geräten. Da mit der Kraftmessdose nur Druck gemessen werden kann, ist der weitere Verlauf von $P(t)$ im Zugbereich nicht dargestellt.

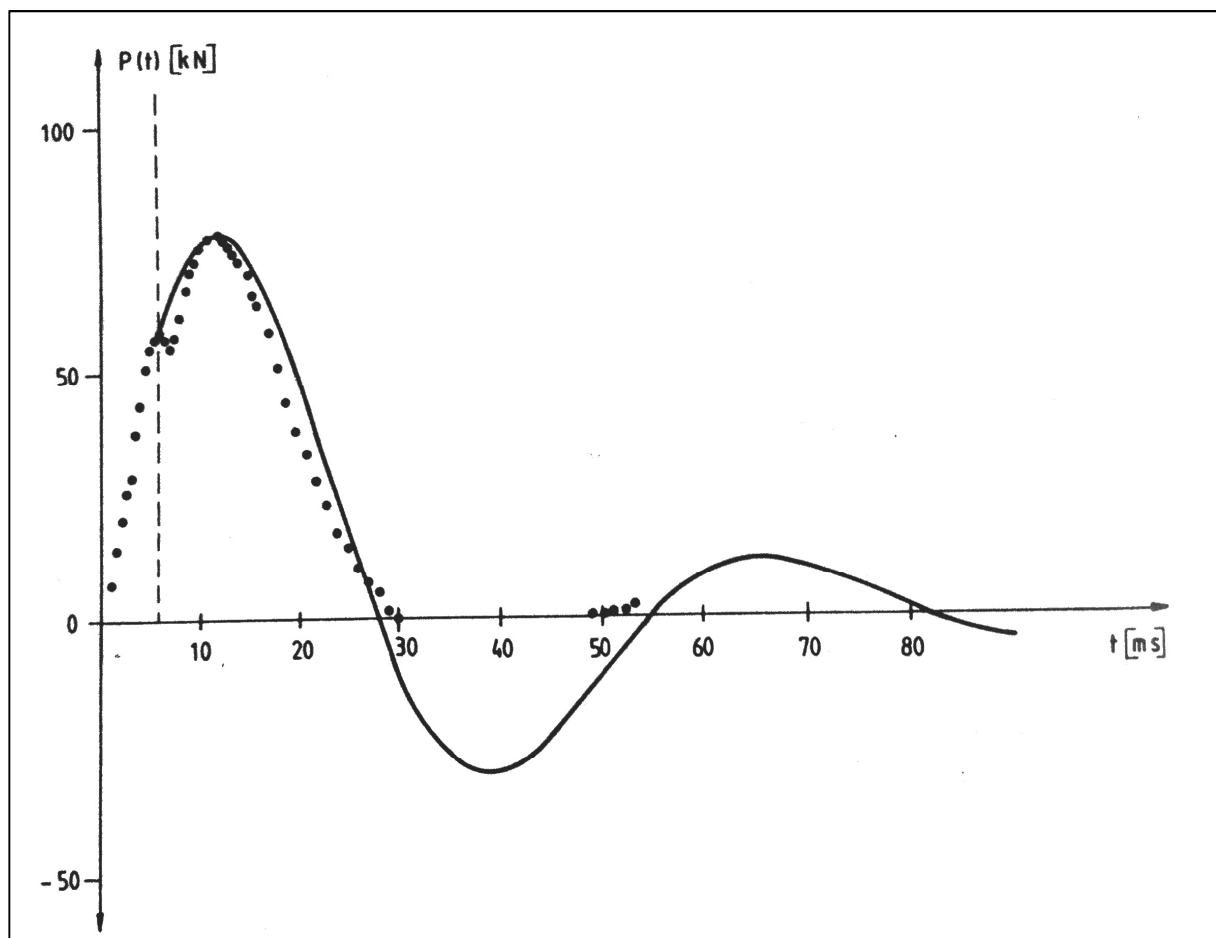


Abbildung 9.3: Kraft $P(t)$ aus einem FWD-Versuch (gepunktet), Angleichung durch Kraftverlauf aus der Modellrechnung (durchgezogene Linie) [8]

In Abbildung 9.3 ist zusätzlich der theoretisch berechnete Kraftverlauf mit eingetragen (durchgezogene Linie). Für diese Berechnung wurde der Nullpunkt in den Knickbereich des Originalimpulses bei $t = 6\text{ms}$ versetzt. Der gemessene Kraftverlauf entspricht für $t > 6\text{ms}$ dem theoretisch berechneten.

Aufgrund der Diskrepanzen zwischen der gemessenen und der theoretisch berechneten Kraftfunktion $P(t)$ ist das in Abbildung 9.1 dargestellte Modell nicht auf das FWD anwendbar. Insbesondere sind für das Verhältnis S/c keine verlässlichen Werte zu erwarten. Daher wird im Folgenden das in Abbildung 9.4 dargestellte Modell beschrieben.

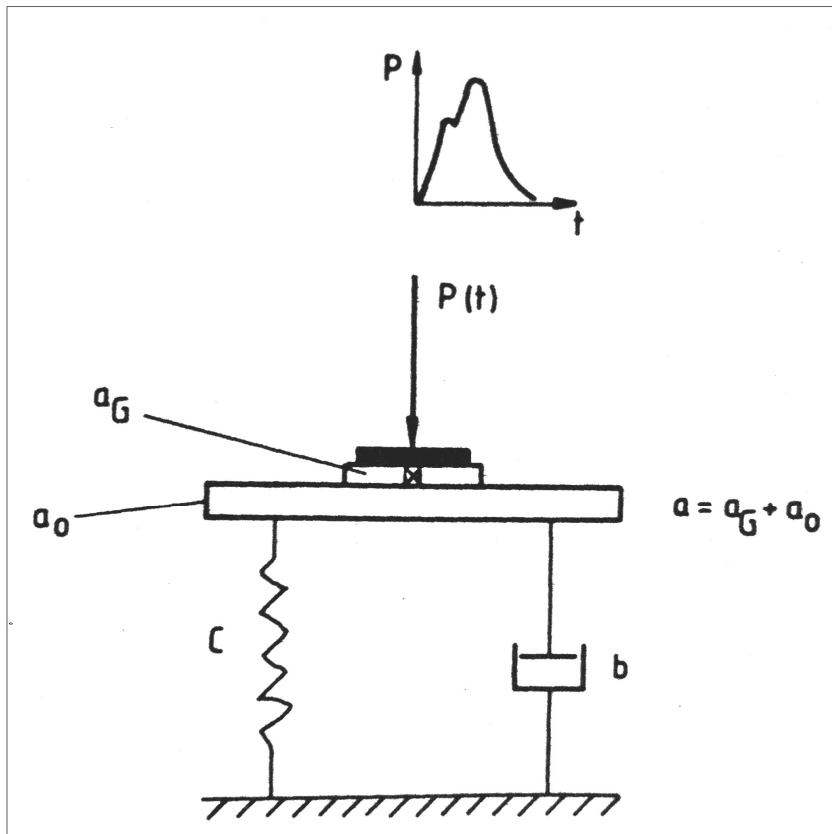


Abbildung 9.4: Reaktion des Modells a, b, c der Straßenbefestigung auf eine beliebige Kraft $P(t)$ [8]

Der gemessene Impuls wird – ohne Erklärung für seine Entstehung – als gegeben angenommen und direkt auf das System a, b, c der Straßenbefestigung aufgebracht. Dabei ist $a = a_0 + b_G$. Die Krafteinleitung erfolgt also an der Schnittstelle zwischen Geschirrmasse und dem Gerätesystem a_F, b_F, c_F . Bei diesem Verfahren wird der Impuls digitalisiert und in einem numerischen Integrationsprozess verarbeitet. Es wird lediglich der aus der Messung bekannte Teil des Impulses zwischen $t = 0$ und 30ms verwendet. Aus der Berechnung der Reaktion $w(t)$ auf diesen Impuls kann das Verhältnis $S = P_0/w_0$ berechnet und in Abhängigkeit von a, b und c dargestellt werden.

Abbildung 9.5 zeigt zwei Beispiele für die Berechnung der Bewegung $w(t)$ als Reaktion auf den FWD-Impuls $P(t)$. Es wurden jeweils die gleiche Masse a und die Steifigkeit c des Straßenmodells, aber unterschiedliche Dämpfungen b angenommen. Die

Bewegung $w(t)$ wurde nur bis $t = 30\text{ms}$ berechnet, da es lediglich darum geht, das Maximum w_0 zur Berechnung der Tragfähigkeit S zu erfassen. Für den ersten Fall ($b = 500\text{ KN}\cdot\text{s/m}$) ist $S = 152\text{ MN/m}$, für den zweiten Fall ($b = 200\text{ KN}\cdot\text{s/m}$) ist $S = 129\text{ MN/m}$. Es entstehen also unterschiedliche Tragfähigkeiten S aufgrund der Größe der Dämpfung b .

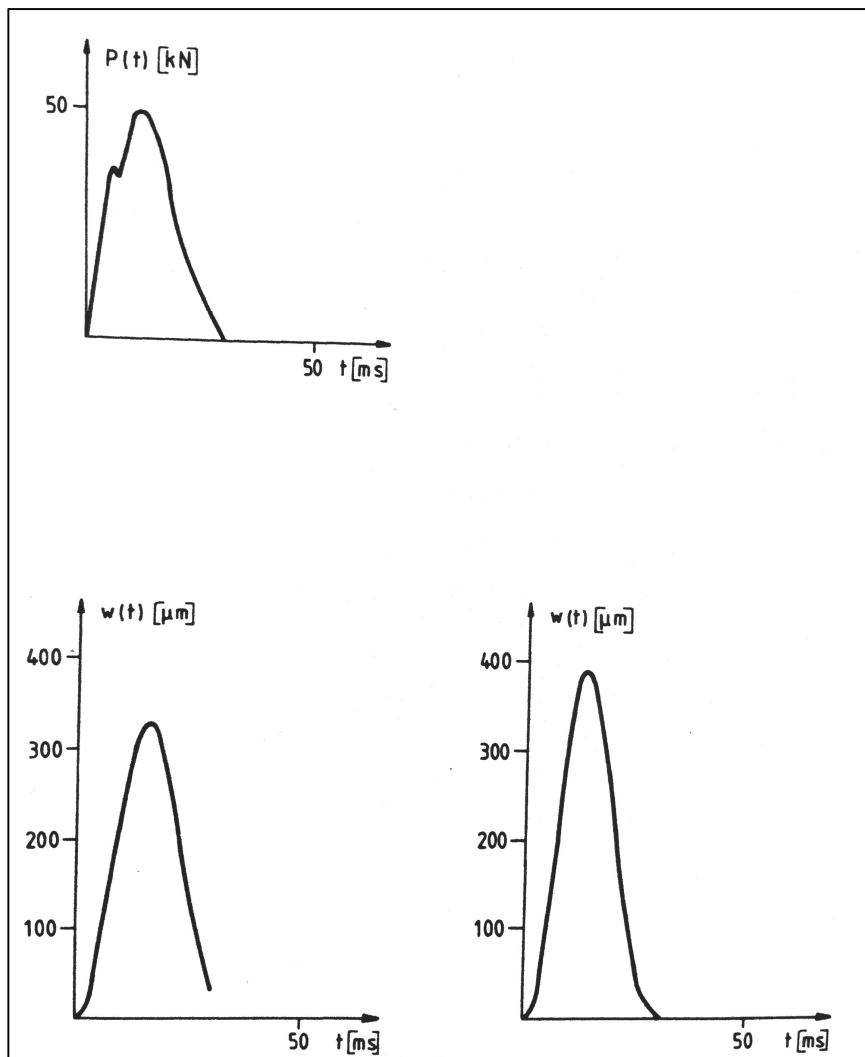


Abbildung 9.5: Reaktion $w(t)$ des Straßenmodells a, b, c auf den FWD-Impuls, $a=1.000\text{kg}$, $c=150\text{MN/m}$, Links: $b = 500\text{ KN}\cdot\text{s/m}$; Rechts: $b = 200\text{ KN}\cdot\text{s/m}$ [8]

Beim FWD wird zur Bestimmung der Deflexionsmulde die Bewegung $w(t)$ der Straßenoberfläche an mehreren Punkten außerhalb der Lastachse gemessen. Für die Auswertung wird das Maxima w_0 der Bewegung $w(t)$ verwendet. In Abhängigkeit von Abstand r zum Lastzentrum wird der Wert $w_0(r)$ ermittelt. Der Wert $w_0(r)$ wird als elastostatische Mulde interpretiert und mit Hilfe der Mehrschichtentheorie ausgewertet.

Ist $w(r)$ die elastische Mulde, so wird angenommen, dass $w(r)/w_0(r) = \text{konstant}$ ist, d.h. dass die Abnahme der Impulsmaxima $w_0(r)$ mit der Entfernung vom Lastzentrum der statischen Mulde $w(r)$ proportional ist. Bei der Modellinterpretation durch ein schwingungsfähiges System a, b, c wurde für $r = 0$ die Steifigkeit c mit der dynamischen Steifigkeit S (Tragfähigkeit) verglichen. Dabei ist $S = P_0/w_0(0)$ und $c = P_0/w(0)$.

Es gilt dann

$$\frac{w(0)}{w_0(0)} = \frac{S}{c} \quad (9.1)$$

In einer Formulierung für Punkte außerhalb des Lastzentrums ergibt sich hieraus

$$\frac{w(r)}{w_0(r)} = \frac{\bar{S}}{\bar{c}} \quad (9.2)$$

Über die Annahme der Proportionalität

$$\frac{\bar{S}}{\bar{c}} = \alpha * \frac{S}{c} \quad (9.3)$$

ergibt sich

$$w(r) = \alpha * \frac{S}{c} * w_0(r) \quad (9.4)$$

Soll die „dynamische Mulde“ $w_0(r)$ mit der elastostatischen Mulde $w(r)$ übereinstimmen, so muss $S = c$ und $\alpha = 1$ sein. Die erste Forderung kann nach Abbildung 9.6 abgeschätzt werden. In Abbildung 9.6 ist das Verhältnis S/c in Abhängigkeit von der Steifigkeit c für drei Größen der Dämpfung dargestellt. Es ist zu erkennen, dass der Einfluss der Dämpfung erheblich ist. Für $b = 1.000 \text{ KN*s/m}$ und $c = 100 \text{ MN/m}$ ist $S/c = 1,5$ und somit für eine elastizitätstheoretische Rechnung im Mehrschichtensystem nicht geeignet. Bei einer mittleren Dämpfung von $b = 500 \text{ KN*s/m}$, welche im dynamischen Lastplattenversuch oft beobachtet wird, kann aber für eine Steifigkeit $c > 140 \text{ MN/m}$ $S \approx c$ angenommen werden. Dies ist für die Anwendung mit dem FWD ein günstiger Umstand.

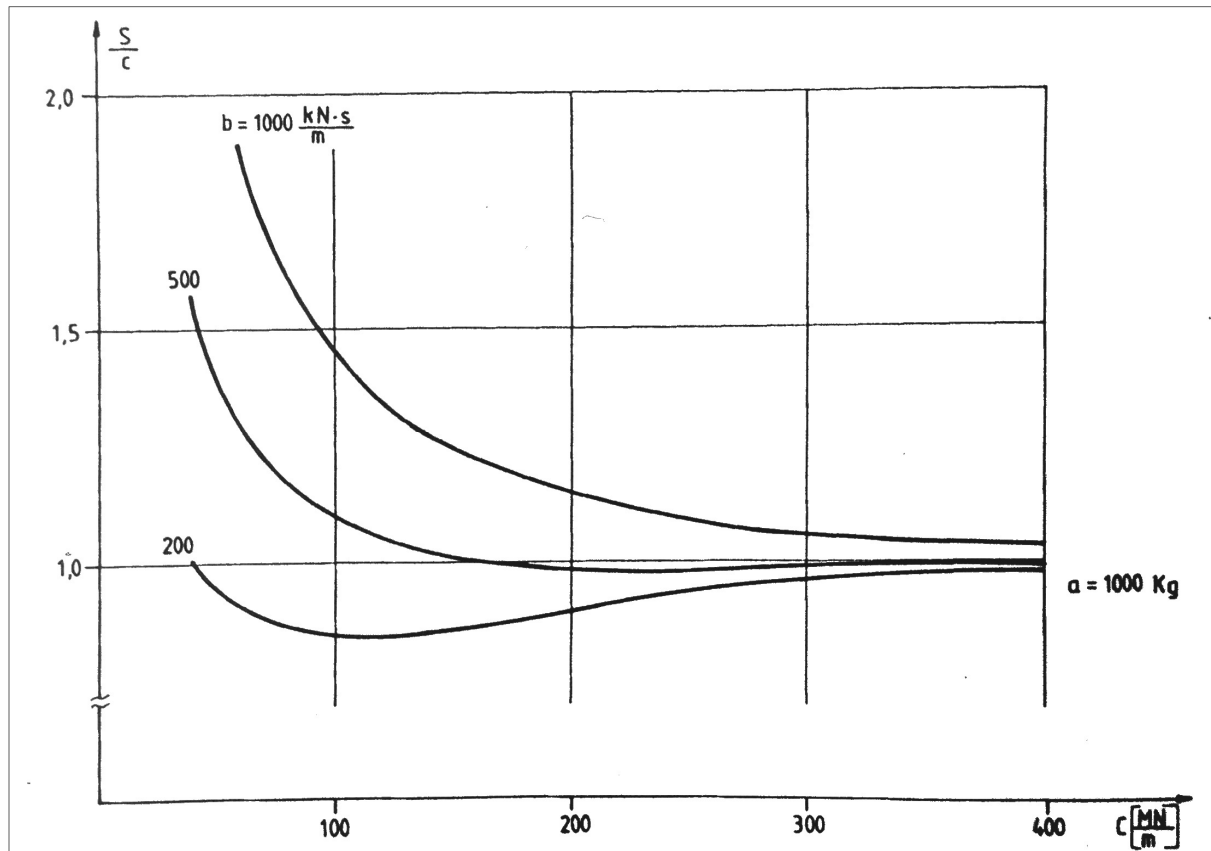


Abbildung 9.6: Einfluss von Masse a und Dämpfung b auf die Tragfähigkeit S [8]

Für die zweite Forderung ist jedoch der Faktor α nicht bestimmbar. Bei der elastostatischen Interpretation der Mulde ergibt sich eine Unsicherheit bezüglich des Faktors α , da dieser nicht eindeutig bestimmbar ist.

Für die Anwendbarkeit des Ansatzes (9.4) wird vorausgesetzt, dass die Impulsform $w(t)/w_0(r)$ an jedem Punkt r gleich ist. Der durch den Laststoß ausgelöste Impuls pflanzt sich an der Oberfläche als seismische Welle fort. Bei einem geschichteten elastischen System tritt hierdurch ein Phänomen auf, welches als Dispersion bezeichnet wird. Infolge der Dispersion ändert sich die Impulsform mit zunehmender Entfernung vom Entstehungsort und die jeweils ermittelten Maxima $w_0(r)$ sind damit nicht mehr vergleichbar.

Die Ursache für die Dispersion wird nachfolgend beschrieben. Der im Lastmittelpunkt erzeugte Impuls kann durch die Fourier-Analyse in eine Anzahl von harmonischen (sinusförmigen) Teilwellen verschiedener Wellenlänge mit unterschiedlichen Amplituden und bestimmten Phasenbezeichnungen zueinander zerlegt werden. Ein anschauliches Beispiel für eine derartige Zerlegung und die daraus schrittweise durchgeführte Überlagerung von Teilwellen zur Wiederherstellung der Impulsfigur ist

in Abbildung 9.7 dargestellt. Je höher die Anzahl von Wellen, welche überlagert wurden, desto detaillierter wird die Impulsfigur rekonstruiert.

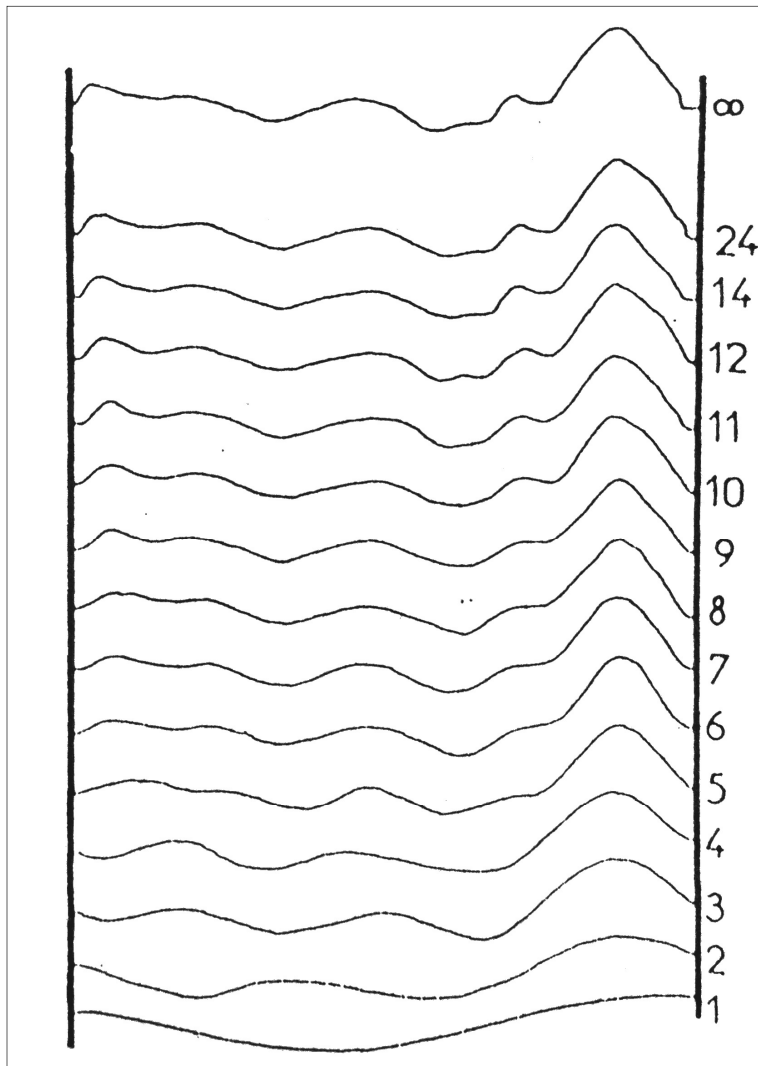


Abbildung 9.7: Zur Fourier-Analyse und Synthese [18]

Mit Dispersion wird zunächst die Erscheinung bezeichnet, dass die Fortpflanzungsgeschwindigkeit V (Phasengeschwindigkeit) einer Sinuswelle von der Wellenlänge (Frequenz) abhängig ist. Die Teilwellen des Impulses breiten sich also mit unterschiedlicher Geschwindigkeit aus, so dass sich in einer bestimmten Entfernung r die Phasenbeziehungen zueinander geändert haben. Werden bei r die Teilwellen durch Fourier-Synthese wieder überlagert, so erhält man eine andere Impulsfigur. Die in verschiedenen Entfernungen ermittelten Impulse sind somit nicht mehr vergleichbar.

Bei Straßen tritt die Dispersion in sehr ausgeprägter Form auf. In Abbildung 9.8 sind die Ergebnisse einer mit Schwingern durchgeführten Dispersionsmessung an einer Betonstraßenbefestigung dargestellt.

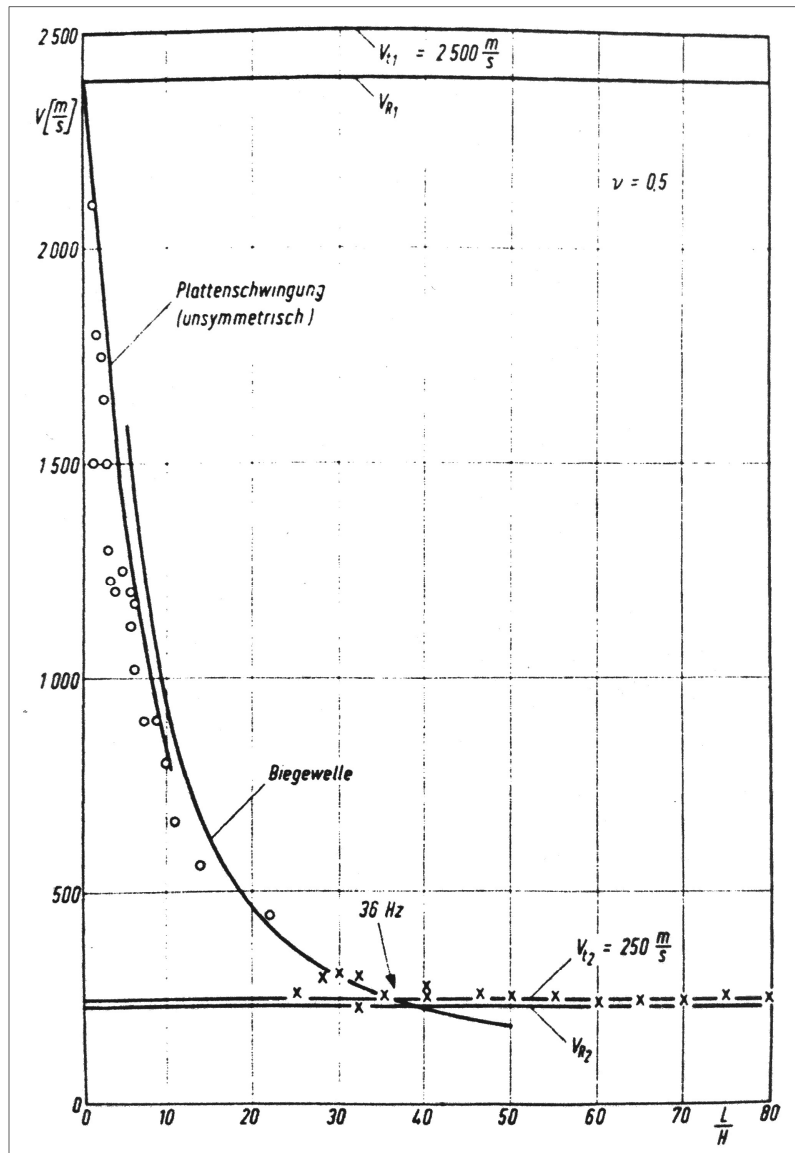


Abbildung 9.8: Dispersionsmessung auf der Autobahn Hamburg-Hannover (Beton) [7]

Die Phasengeschwindigkeit V ist in Abhängigkeit von L/H dargestellt, wobei L die Wellenlänge und H die Dicke der Betondecke ist. Die Phasengeschwindigkeit verläuft hier zwischen 2.500 – 250m/s.

Zur Untersuchung der Auswirkung der Dispersion auf den Impuls, wurde als Näherung die Dispersionskurve einer Biegewelle verwendet. Für $r = 0$ wurde ein Impuls konstruiert, der dem Verlauf von $w(t)$ aus Abbildung 9.2 ähnelt. Die Zerlegung in Teilwellen erfolgt durch die Fourier-Transformation in ein kontinuierliches Spektrum. Bei verschiedenen Entfernungen r von Entstehungsort wird das veränderte Spektrum durch Fourier-Transformation wieder in einen Impuls umgerechnet. In Abbildung 9.9 ist das Ergebnis für die Entfernung $r = 0$ (Original Impuls am Lastzentrum), $r = 1\text{m}$, 2m , 10m und 20m dargestellt. Eine Abnahme der Bewegungsgröße $w(t)$ mit der Ent-

fernung r ist in der Rechnung nicht enthalten, d.h. ohne Dispersion würde bei jeder Entfernung r der gleiche Impuls erscheinen, der auf der Zeitachse lediglich um eine Laufzeit $t = r/v$ verschoben ist ($v = \text{konstant}$). Der Effekt der Dispersion ist in Abbildung 9.9 deutlich zu erkennen. Der Impuls „zerfließt“ mit zunehmender Entfernung zum Lastzentrum. Das für die Anwendung des FWD-Verfahrens positive Ergebnis ist, dass bis $r = 2\text{ m}$ (maximaler Messabstand des FWD) die Dispersion zu keiner nennenswerten Verfälschung führt. Zusätzlich ist anzumerken, dass die Dispersionsannahme einer Biegewelle für Beton besonders ungünstig ist, da die Geschwindigkeit der seismischen Schwerwelle bei Asphalt wesentlich geringer ist.

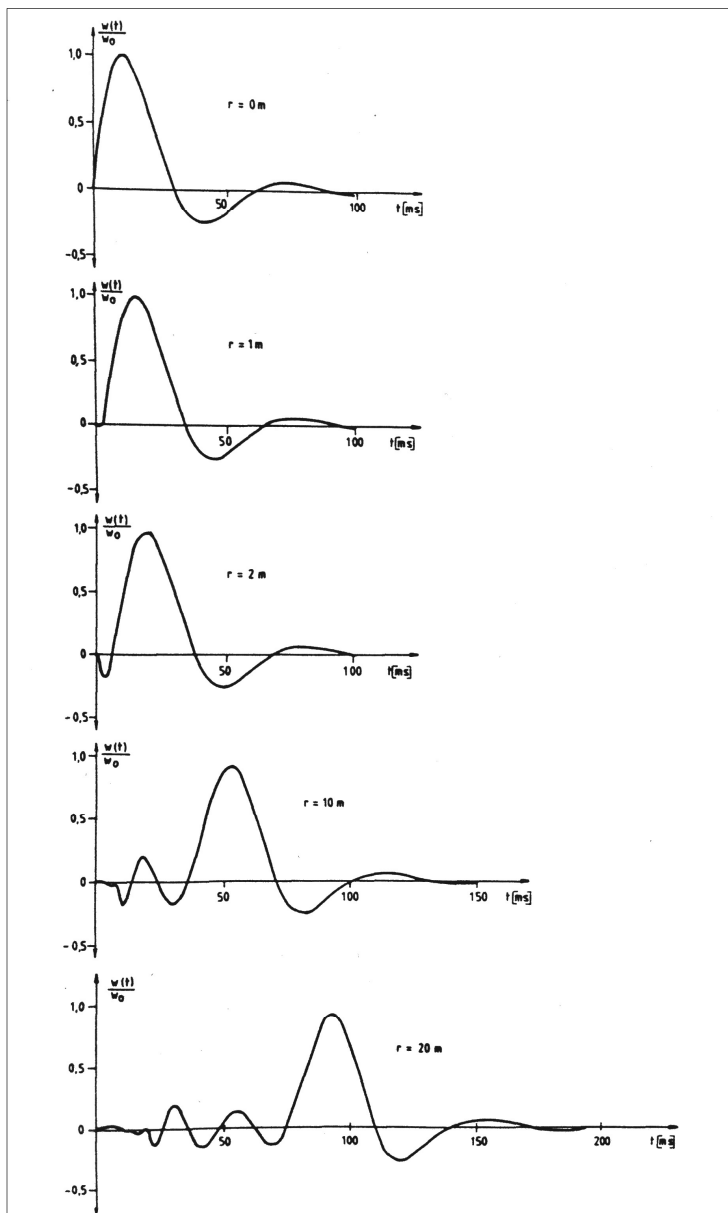


Abbildung 9.9: Deflexionsimpuls $w(t)$ mit Dispersion bei verschiedenen Entfernungen r vom Lastzentrum [8]

Anlage 7 Algorithmus zur quantitativen Bewertung der Tragfähigkeit von Asphaltstraßenbefestigungen

Nachfolgend wird der Algorithmus der quantitativen Bewertung von Asphaltbefestigungen vorgestellt. Zur quantitativen Bewertung der Tragfähigkeit wurden die nachfolgenden sechs Tragfähigkeitsklassen definiert.

Tragfähigkeitsklasse	Entspricht der Belastungsklasse nach RStO 12 [44]	Verkehrsbeanspruchung (Äquivalenter 10t-Achsübergang in Mio.)
A	Bk100	> 32
B	Bk32	10 - 32
C	Bk10	3,2 – 10
D	Bk3,2	1,8 – 3,2
E	Bk1,8	1,0 – 1,8
F	< Bk1,8	< 1,0

Schritt 1: Überprüfung der Bettungstragfähigkeit

Mit Hilfe der Deflexion D_{1800} wird die Tragfähigkeit der Bettung überprüft.

- I. Die Bettung ist nicht ausreichend tragfähig (Bettungsmodul < 115 MN/m²), wenn die Deflexion D_{1800} < 0,07 mm ist. Die Tragfähigkeit der gesamten Asphaltbefestigung ist nicht ausreichend tragfähig.
- II. Ist die Deflexion $D_{1800} \geq 0,07$ mm ist die Bettung ausreichend tragfähig (Bettungsmodul ≥ 115 MN/m²) und die Tragfähigkeitsklasse kann bestimmt werden.

Schritt 2: Temperaturkorrektur der gemessenen Deflexionsmulde

Die gemessene Deflexionsmulde wird zur Bestimmung der Tragfähigkeitsklasse nach JANSEN [31] temperaturkorrigiert.

Schritt 3: Untergrundkorrektur der temperaturkorrigierten Deflexionsmulde

Der Oberbaumodul wird mit Hilfe der Formeln aus der nachfolgenden Tabelle berechnet. Die passende Formel wird anhand der Deflexion D_{1800} der temperaturkorrigierten Deflexionsmulde ausgewählt.

Deflexion am Geofonabstand 1800mm (D_{1800}) [mm]	> 0,056	0,056-0,043	0,042-0,029	< 0,029
Formel Oberbaumodul [MN/m ²]	$E_A = 299,8 * D_{diff}^{-1,335} - 435,2$	$E_A = 247,3 * D_{diff}^{-1,365} - 385,4$	$E_A = 187,8 * D_{diff}^{-1,407} - 329,6$	$E_A = 119,3 * D_{diff}^{-1,472} - 172,8$
E_A : Oberbaumodul [MN/m ²] D_{diff} : Differenz zwischen D_0 und D_{1500} (Einknickdifferenz) $D_{diff} = D_0 - D_{1500}$ [mm]				

Die Verschiebungsfaktoren werden anhand des zuvor berechneten Oberbaumoduls E_A und der Deflexion D_{1800} mit nachfolgender Formel berechnet. Die Verschiebungsfaktoren werden für jedes Geofon einzeln berechnet.

$F_{Geofon} = p00 + p10 * E_A + p01 * U_E + p20 * E_A^2 + p11 * E_A * U_E + p02 * U_E^2 + p21 * E_A^2 * U_E + p12 * E_A * U_E^2 + p03 * U_E^3 + p22 * E_A^2 * U_E^2 + p13 * E_A^3 * U_E^3 + p04 * U_E^4 + p23 * E_A^2 * U_E^3 + p14 * E_A^4 * U_E^4 + p05 * U_E^5$ F_{Geofon} : Verschiebungsfaktor am Abstand zum Lastzentrum [-] $p00...p05$: Koeffizienten E_A : Oberbaumodul [-] U_E : Deflexion am Abstand zum Lastzentrum 1800mm [mm]									
	Abstand zum Lastzentrum (Geofon)								
	0	200	300	450	600	900	1200	1500	1800
	Koeffizienten								
p00	3,251	5,868	7,640	9,483	10,850	12,680	13,580	13,820	13,710
p10	0,00017430	0,00002731	-0,00009958	-0,00021970	-0,00028900	-0,00032520	-0,00026570	-0,00015580	-0,00003887
p01	-147,3	-348,8	-493,5	-647,5	-763	-919,4	-1001	-1030	-1031
p20	-4,160E-09	-8,541E-10	2,247E-09	5,112E-09	6,618E-09	6,899E-09	4,764E-09	1,569E-09	1,457E-09
p11	-0,010230	-0,002087	0,005893	0,01367	0,01813	0,02027	0,01624	0,009165	0,001815
p02	5410	12460	17580	23160	27410	33370	36790	38380	38950
p21	2,151E-07	5,829E-08	-1,150E-07	-2,793E-07	-3,638E-07	-3,701E-07	-2,380E-07	-5,317E-08	-1,135E-07
p12	0,23770	0,05367	-0,13880	-0,33050	-0,44180	-0,49790	-0,40370	-0,23540	-0,05927
p03	-115300	-246800	-341100	-445700	-527100	-645600	-720400	-762200	-783800
p22	-0,000003970	-0,000001262	0,000002097	0,000005343	0,000006990	0,000006993	0,000004279	0,000000630	0,000002554
p13	-2,4600	-0,5436	1,4710	3,5150	4,7380	5,4590	4,6110	2,9410	1,1120
p04	1259000	2515000	3398000	4391000	5178000	6370000	7181000	7690000	8003000
p23	0,00002519	0,00000873	-0,00001317	-0,00003458	-0,00004537	-0,00004493	-0,00002669	-0,00000272	-0,00001778
p14	9,125	1,726	-5,684	-13,360	-18,190	-21,820	-19,720	-14,220	-7,540
p05	-5431000	-10270000	-13590000	-17370000	-20430000	-25190000	-28630000	-30960000	-32530000

Die untergrundkorrigierte Deflexionsmulde wird aus der temperaturkorrigierten Deflexionsmulde mit

$$D(\alpha)_i = D_i * \alpha_i$$

$D(\alpha)_i$ Mit Verschiebungsfaktor α verschobene Deflexion am Geofon i

D_i Deflexion am Geofon i

α_i Verschiebungsfaktor für Geofon i

berechnet.

Schritt 4: Bestimmung der Tragfähigkeitsklasse

Die Bestimmung der Tragfähigkeitsklasse kann anhand der temperatur- und untergrundkorrigierten Deflexionsmulde erfolgen.

Die Deflexionsdifferenz wird mit

$$D_{diff} = D_0 - D_{1500} [mm]$$

D_{diff} [mm] Differenz zwischen D_0 und D_{1500} (Deflexionsdifferenz)

D_0 [mm] Deflexion im Lastzentrum

D_{1500} [mm] Deflexion am Geofon mit einem Abstand von 1500 mm zum Lastzentrum

für die temperatur- und untergrundkorrigierte Deflexionsmulde berechnet. Mit der berechneten Deflexionsdifferenz wird die Tragfähigkeitsklasse der gemessenen Deflexionsmulden aus der nachfolgender Tabelle bestimmt.

Bereich der Deflexionsdifferenz D_{diff} [mm]		Tragfähigkeitsklasse
von	bis	
-	0,09278	A
0,09278	0,10755	B
0,10755	0,12693	C
0,12693	0,15300	D
0,15300	0,16949	E
0,16949	-	F

Bisher erschienen

SCHRIFTENREIHE DES
INSTITUTES FÜR STRASSENBAU UND VERKEHRSWESEN

- | | |
|--------|--|
| Heft 1 | Stefan Ludwig
Entwicklung von langlebigen Deckschichten aus Asphalt unter Verwendung von Epoxydharz, 2009 |
| Heft 2 | Dirk Jansen
Temperaturkorrektur von mit dem Falling-Weight-Deflectometer gemessenen Deflexionen auf Asphaltbefestigungen, 2009 |
| Heft 3 | Edeltraud Straube, Dirk Jansen
Machbarkeitsstudie zur Auswertung und Bewertung griffigkeitsverbessernder Maßnahmen durch abtragende Verfahren auf Asphaltstraßen in Nordrhein-Westfalen und Rheinland-Pfalz, 2010 |
| Heft 4 | Marcel Knauff
Quantitative Bewertung der Tragfähigkeit von Asphaltbefestigungen durch Falling-Weight-Deflectometer Messungen, 2015 |

Ebenfalls erschienen

SCHRIFTENREIHE DES
FACHGEBIETES VERKEHRSWESEN UND VERKEHRSSBAU

- | | |
|--------|--|
| Band 1 | K.-G. Kuchenbecker, G. Hartkopf, R. Kühne
Festkolloquium zum 60. Geburtstag von Jörg Schönharting, 2001 |
| Band 2 | St. Bremer, D. Bruckmann, T. Janßen, J.A. Schmidt, J. Schönharting, E. Wolf
Metrorapid / Transrapid: Vernetzung, Umfeld und Verkehrsträger, 2005 |
| Band 3 | Sandra Terporten
Ein neues Verfahren zur Kombination von Mehrfahrgast-Taxi und ÖPNV – Das KOMET-System, 2004 |
| Band 4 | Urte Helling
Fahrtzeit- und Informationsvorteile durch Dynamische Zielführung – Der Einfluss der Verkehrsmeldungsqualität unter Beachtung von Netzauslastungen und Alternativrouten, 2006 |
| Band 5 | Dirk Bruckmann
Containerisierung des Einzelwagenverkehrs – Entwicklung einer Methode zur Abschätzung des containerisierbaren Aufkommens im Einzelwagenverkehr und Optimierung der Produktionsstruktur, 2006 |
| Band 6 | Stefan Tetzner
Ansatz zur Verbesserung der Positionsbestimmung als ein Beitrag zur Optimierung von Navigationssystemen für Radfahrer, 2008 |

Universität Duisburg-Essen
Institut für Straßenbau und Verkehrswesen
Institute of Road and Traffic Engineering
Prof. Dr. rer. nat. habil. Doru C. Lupascu
(Kommissarische Leitung)

ISBN 978-3-940402-05-9